

东北地区晚古生代-中生代 I 型和 A 型花岗岩 Nd 同位素变化趋势及其构造意义^{*}

李竞妍^{1,2} 郭锋^{1**} 李超文¹ 李红霞¹ 赵亮¹

LI JingYan^{1,2}, GUO Feng^{1**}, LI ChaoWen¹, LI HongXia¹ and ZHAO Liang¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

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

2013-08-10 收稿, 2013-12-19 改回.

LI JY, Guo F, Li CW, Li HX and Zhao L. 2014. Neodymium isotopic variations of Late Paleozoic to Mesozoic I- and A-type granitoids in NE China: Implications for tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7):1995–2008

Abstract The northeastern China is located in the eastern segment of the gigantic accreting continental margin of the central-Asian orogenic belt, in which the subduction-accretion complexes added ~5.3Mkm² of material to Asia. In the NE China region distributes voluminous Phanerozoic granitoids and volcanic lavas, which were mostly of juvenile origin. A compilation of age spectrum and Nd isotopic compositions of the Late Paleozoic to Mesozoic I- and A-type granites in NE China is presented in this paper. There exist two contrasting Nd isotopic variation trends for the I-type granites. One is represented by those granites occurring in the Erguna and Xing'an Blocks, which show a progressive increase of $\varepsilon_{Nd}(t)$ following the youthening of the emplacement age. Such a Nd isotopic variation was likely resulted from crustal growth in response to either orogenic collapse and asthenospheric upwelling or the subduction-related accretion through coeval subduction of the Mongolia-Okhotsk Ocean. The other is represented by the I-type granites in SW Songnen Block and Zhangguangcai Range, which show a progressive decrease of $\varepsilon_{Nd}(t)$ value following the youthening of intrusive age. A likely explanation for such Nd isotopic change is that the melting source of the granitic magmas migrated from lower-middle subarc-type juvenile crust to the middle-upper crust, where the protolith components comprise higher proportion of recycled crustal materials. By contrast, the majority of the Late Paleozoic to Mesozoic A-type granitoids have positive $\varepsilon_{Nd}(t)$ values with two-stage Nd model age below 1.0Ga, also indicating the role of Phanerozoic crustal growth in NE China. They can be roughly grouped into three emplacement periods, which were corresponding to three stages of lithospheric extension events. The Late Paleozoic A-type granites distribute roughly along the Hegenshan-Heihe fault, so their origin was likely related to the post-collisional extension after the collision between Xing'an and Songnen Blocks. The Early Mesozoic A-type granites distributing along the Zhangguangcai Range were genetically related to the post-collisional extension after the collision between the Jiamusi-Khanka and Songnen Blocks. The Early Cretaceous A-type granites occurring all over the NE China were likely formed under lithospheric extension related to subduction and rollback of the paleo-Pacific Ocean. A comparison between the t_{DM2} (two-stage Nd model age) and emplacement age of Late Paleozoic to Mesozoic granitoids shows the differences of crustal growth among different tectonic units in NE China. Similar to the Mesozoic granitoids occurring in northern margin of North China Craton, the granitoids occurring in the Erguna and Jiamusi Blocks have t_{DM2} 1000Ma more than their intrusive ages, suggesting that beneath these two blocks may exist ancient basement rocks. The granitoids outcropping in the Xing'an Block, SW Songnen Block and Zhangguangcai Range have the difference between t_{DM2} and formation age ranging from 300Ma to 1000Ma, implying different proportional mixing of crustal components (juvenile and recycled crustal materials) in their melting sources. By contrast, the granitoids with difference between t_{DM2} and intrusive age less than 300Ma are very rare, except for the sample from the Chagan pluton from the Wulanhaote area, the origin of which was likely derived from the melting of newly accreted juvenile crust. In terms of Nd isotopic compositions, the crustal growth during the Late Paleozoic to Mesozoic time mainly occurred around or

* 本文受国家“973”项目(2013CB429804)和国家青年自然科学基金项目(40973024)联合资助.

第一作者简介: 李竞妍, 女, 1987年生, 博士生, 岩石学专业, E-mail: lijingyan@gig.ac.cn

** 通讯作者: 郭锋, 男, 1971年生, 博士, 研究员, 岩石学专业, E-mail: guofeng@263.net

along the previous collisional sutures and lithosphere-scale faults, in which depleted mantle-derived magmas ascended along these faults to different crustal levels to produce the intermediate to felsic igneous rocks that have relative higher $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ and lower t_{DM2} . Except for several special plutons (e.g., Suolunzhen, Luoguhe and Xiaochengzi plutons) have excessively depleted or enriched Nd isotopic compositions, most of the Early Cretaceous felsic igneous rocks in NE China have an $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ range from 0 to +3. This implies that the Nd isotopic compositions of the lower-middle crustal source components for the granitoids throughout the NE China became similar, possibly related to contemporaneous subduction of the paleo-Pacific Ocean. Our results suggest that the origins of the Late Paleozoic to Mesozoic granitoids in NE China were tectonically linked with the evolution of the paleo-Asian, Mongolia-Okhotsk and paleo-Pacific Ocean. Spreading and subduction of these three oceans added voluminous juvenile crustal materials into the crust and remelting of both the juvenile and recycled crustal protoliths formed the large-scale Phanerozoic granitoids and their eruptive counterparts across the NE China.

Key words Nd isotopic variations; Tectonic evolution; Granitoids; Late Paleozoic-Mesozoic; NE China

摘要 中国东北地区位于中亚造山带巨型增生陆缘的东段,分布着巨量的具有新生特征的显生宙花岗岩和火山岩。本文对东北地区晚古生代-中生代 I 和 A 型花岗岩年代学和 Nd 同位素组成开展了综合分析和研究。东北地区的 I 型花岗岩有两种 Nd 同位素变化趋势:一是以额尔古纳和兴安地块为代表,其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随着年龄变新而增大,与造山带垮塌、软流圈上涌的幔源熔体或蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲交代地幔楔熔体加入引起的地壳增生作用相关。二是以松嫩地块西南区和张广才岭为代表, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随着年龄变新而下降,反映花岗岩的熔融源区有从早期的新生岛弧中、下地壳向晚期含更多再循环物质的中、上地壳迁移的趋势。A 型花岗岩侵位时代主要有三期,总体上具有正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,绝大部分 $t_{\text{DM2}} < 1.0\text{Ga}$,反映了东北地区强烈的地壳增生作用。晚古生代 A 型花岗岩主要沿着贺根山-黑河断裂分布,可能与兴安和松嫩地块碰撞后伸展作用相关;早中生代 A 型花岗岩主体分布于张广才岭,与松嫩、佳木斯和兴凯地块的碰撞后伸展作用相关;早白垩世 A 型花岗岩遍布整个东北地区,可能与古太平洋板块俯冲、后撤导致的区域性伸展作用相关。晚古生代-中生代花岗岩的 Nd 二阶段模式年龄(t_{DM2})与侵位年龄(t)的对比展示了东北各构造单元地壳增生作用的差异。与华北北缘中生代花岗岩的特征相似,额尔古纳和佳木斯地块的花岗岩表现出 $t_{\text{DM2}} > t + 1000\text{Ma}$ 的特征,表明这两个地块具有古老的结晶基底。兴安地块、松嫩地块西南区和张广才岭花岗岩的 t_{DM2} 和侵位年龄差值集中在 $300 \sim 1000\text{Ma}$,反映不同属性(年轻 vs. 古老)的地壳物质对熔融源区的贡献。东北地区 t_{DM2} 和侵位年龄差值小于 300Ma 的花岗岩岩体极少,仅有乌兰浩特的查干岩体一例,可能由新近增生的新生地壳熔融形成。由 Nd 同位素特征显示,晚古生代-中生代东北地区显著的地壳增生作用主要发生在缝合带和岩石圈规模的断裂带,幔源岩浆沿断裂带上升到地壳不同深度并形成高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和低 t_{DM2} 的中酸性火成岩。除几个特殊岩体表现出过于亏损或富集 Nd 同位素的特征,早白垩世东北地区酸性火成岩的 Nd 同位素组成相近, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值集中在 $0 \sim +3$ 之间,可能暗示此时期东北地区的中、下地壳成分组成趋于一致并与同时期的古太平洋俯冲作用有关。我们的结果显示东北地区晚古生代-中生代花岗岩的起源与古亚洲洋、蒙古鄂霍茨克洋和古太平洋的构造演化相关。这三个古大洋的扩张和俯冲作用提供了大量新生地壳物质,而新生和再循环地壳物质的重熔形成了东北地区大规模的显生宙花岗岩及其对应成分的喷出岩。

关键词 Nd 同位素;构造演化;花岗岩;晚古生代-中生代;东北地区

中图法分类号 P588.121

1 引言

东北地区分布着出露面积多达 200000km^2 的显生宙花岗岩,占据了至少 50% 的山区。该区的火成岩年代学工作显示大部分花岗岩主要形成于中生代(Wu *et al.*, 2011)。这些花岗岩具正 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和低 t_{DM2} ,反映区域在显生宙存在强烈的地壳增生。然而全球大陆地壳的增生时间主要发生在太古代-早元古代,显生宙以来的地壳净增生量非常小(Armstrong, 1991)。因此,包括中国东北在内的中亚造山带,其显著的显生宙地壳增生现象引起了国内外学者的广泛关注(Han *et al.*, 1997; Jahn *et al.*, 2000, 2001; Chen *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2000, 2002; Hong *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005; Guo *et al.*, 2009)。

自古生代以来,东北地区经历了古亚洲洋、蒙古-鄂霍茨

克洋闭合以及华北-蒙古联合陆块与西伯利亚板块的碰撞拼合等多期重要构造事件,于晚中生代进入到岩石圈伸展环境,期间整个东北地区发育了大量的长英质岩浆作用。尽管前人对区域中生代中酸性火成岩开展了相关的综合研究(Guo *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2011),但主要集中在构造区划和地壳增生机制的探讨,对不同时期花岗岩浆作用与大地构造演化之间的联系还较薄弱。本文选取晚古生代-中生代的花岗岩,通过总结和对比区域不同时期花岗岩的 Nd 同位素组成异同,以探讨区域构造演化事件对花岗岩浆作用的影响。

2 区域大地构造

东北地区及其邻区是东北亚陆缘增生、陆-弧/陆-陆碰撞的造山带,包括中亚造山带的最东段和部分中生代的环太平

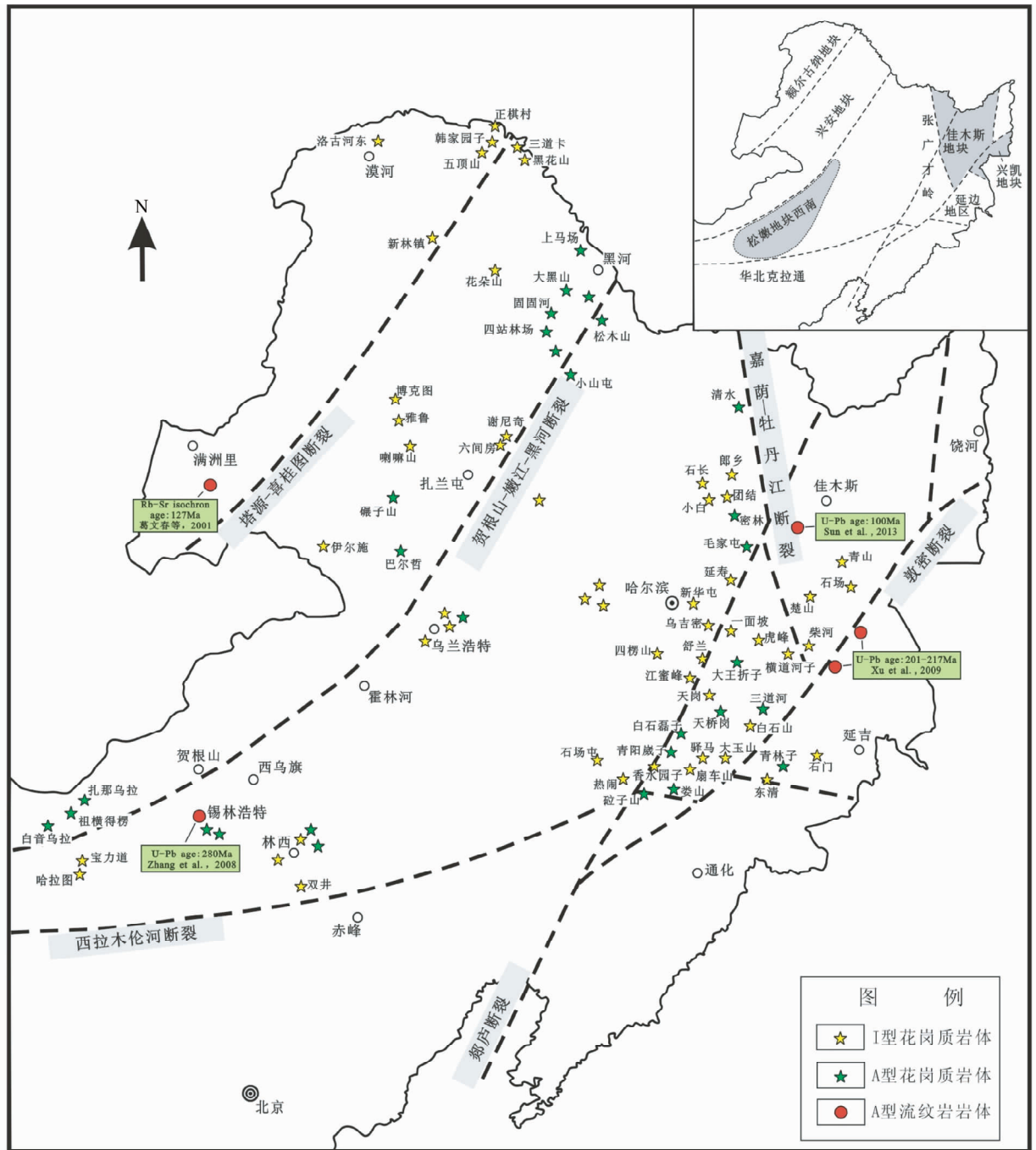


图1 东北地区构造地质单元划分及本文讨论的花岗岩岩体位置 (据 Guo *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2011 修改)

Fig.1 Tectonic sub-divisions of NE China and the spatial distribution of granitic plutons discussed in this paper (modified after Guo *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2011)

洋增生杂岩 (Sengör *et al.*, 1993; 唐克东等, 1995; Wu *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2007; Zhou and Wilde, 2013)。关于东北地区的构造单元划分,前人从不同角度提出了多种划分方案 (Sengör *et al.*, 1993; Wu *et al.*, 2000; Guo *et al.*, 2010)。本文采用目前比较通用的构造单元分区方法,即以东北地区主要断裂带或缝合带围限和区分地块 (图1),从西北向东南依次为额尔古纳地块、兴安地块、松嫩地块、佳木

斯-兴凯地块和完达山增生大陆边缘,地块之间分别以塔源-喜桂图断裂、贺根山-黑河断裂、嘉荫-牡丹江断裂以及敦化-密山断裂为界。松嫩地块由于中间被松辽盆地的沉积层覆盖,仅出露东部靠近佳木斯-兴凯地块的张广才岭、北部的小兴安岭和靠近贺根山-黑河断裂的西南区,因为通过对比发现松嫩地块不同出露区域的 Nd 同位素组成不同 (后述),所以松嫩地块西南区和张广才岭作为两个构造区块进行讨论。

3 数据的选择和处理

本文收集了东北地区近十多年来发表的晚古生代-中生代花岗岩的年代学和 Nd 同位素资料,选取区域上典型的 A 型、I 型花岗岩体并对其同位素及年龄数据进行汇编(结果见

表 1)。图 1 中岩体的地理位置主要参考了 Wu *et al.* (2011) 的 GPS 坐标。目前仅于饶河发现的含堇青石过铝质花岗岩被确认为 S 型花岗岩(程瑞玉等,2006),所以 S 型花岗岩并非东北地区代表性类型的花岗岩;且该岩体缺少同位素数据,这里不做讨论。

东北地区的部分 A 型和 I 型花岗岩在成分上存在一定

表 1 东北地区晚古生代-中生代花岗岩侵位年龄和 Nd 同位素组成

Table 1 Emplacement age and Nd isotopic compositions of the Late Paleozoic-Mesozoic granitoids in NE China

岩体	样品号	GPS 坐标	岩性	Age (Ma)	方法	$\epsilon_{Nd}(t)$	t_{DM2} (Ma)	资料来源
额尔古纳地块 I 型								
洛古河东	ML-1		花岗斑岩	130 ± 2	SHRIMP	-3.25	1187	武广等(2009)
	ML-16		花岗斑岩			-3.45	1202	
	ML-34		石英二长斑岩			-2.64	1136	
新林镇	0075-3	51°36'23", 124°19'26"	花岗闪长岩	131 ± 3	LA-ICPMS	0.80	855	张彦龙等(2008)
	0076-9	51°37'40", 124°09'23"	花岗闪长岩			-0.20	940	
正棋村	GW05064		花岗闪长岩	190 ± 1	LA-ICPMS	-5.78	1441	
	GW05067	52°31'50", 126°08'25"	花岗闪长岩			-6.06	1464	
兴华-翻身屯	GW05085	52°00'23", 126°12'46"	二长花岗岩	178 ± 1	LA-ICPMS	-5.33	1395	
	GW05088		二长花岗岩			-2.47	1161	
五顶山	GW05110		二长花岗岩	188		-9.72	1758	隋振民等(2007), 隋振民和徐学纯(2010)
韩家园子	GW05099	52°02'43", 125°38'40"	石英闪长岩	188 ± 2	LA-ICPMS	-3.68	1269	
	GW05101		石英闪长岩			-5.07	1381	
鸡尾甸子	GW05112	51°52'45", 125°47'40"	二长花岗岩	181 ± 2	LA-ICPMS	-5.52	1413	
	GW05120	51°49'14", 126°16'21"	二长花岗岩	176 ± 2		-5.95	1444	
兴安地块 I 型								
哈拉图	BP20-15		淡色花岗岩	234 ± 7	Rb-Sr 年龄	-2.00	1163	Chen <i>et al.</i> (2000)
	BP21-15		石英二长岩			-2.20	1180	
	BP24-5		花岗闪长岩			1.00	919	
宝力道	93SS-2		石英闪长岩	309 ± 8	SHRIMP	-0.20	1086	
	BP30-9		花岗闪长岩			0.70	1012	
	BP30-11		石英闪长岩			0.40	1032	
喇嘛山	L-1	48°19'50", 122°19'12"	石英二长岩	142 ± 3	LA-ICPMS	1.60	810	Wu <i>et al.</i> (2003b, 2011)
	L-6		正长花岗岩			1.30	839	
伊尔施	YE-1	47°16'30", 119°47'00"	钾长花岗岩	137 ± 2	SHRIMP	1.80	784	Wu <i>et al.</i> (2003b)
	YE-3		正长花岗岩			2.50	734	
	YE-4		钾长花岗岩			2.30	751	
黑花山	GW05127		二长花岗岩	188 ± 2	LA-ICPMS	0.23	950	隋振民等(2007), 隋振民和徐学纯(2010)
	GW05129	50°53'41", 127°05'00"	花岗闪长岩	171 ± 2	LA-ICPMS	1.51	833	
三道卡	GW05133		花岗闪长岩	190		2.54	764	
谢尼奇山	PM ₁₄ LT111		二长花岗岩	161 ± 2	LA-ICPMS	1.90	790	
	PM ₄ LT151		二长花岗岩			1.30	841	
六间房	PM ₅ LT124a		正长花岗岩	172 ± 1	LA-ICPMS	-0.30	982	李欢(2012)
	D2032		二长花岗岩			0.80	892	
	PM ₄ LT148		闪长质包体			2.30	759	
花朵山	9808-1	50°22'50", 125°43'50"	花岗闪长岩	170	LA-ICPMS	3.50	667	
黑河	9834-1		石英二长岩	280	LA-ICPMS	-0.50	1087	
博克图	9436-3		英云闪长岩	156	SHRIMP	0.50	904	
阿里河	9485-3		钾长花岗岩	120	SHRIMP	2.50	707	Wu <i>et al.</i> (2003b)
	S-7		钾长花岗岩			0.70	856	
雅鲁	YL-7	48°36'48", 122°05'42"	钾长花岗岩	145 ± 5	LA-ICPMS	1.20	830	
	YL-8		钾长花岗岩			3.10	677	

续表 1

Continued Table 1

岩体	样品号	GPS 坐标	岩性	Age (Ma)	方法	$\epsilon_{Nd}(t)$	t_{DM2} (Ma)	资料来源
兴安地块 A 型								
巴尔哲	Ba-6		碱性花岗岩	122 ± 5	Rb-Sr 年龄	2.40	716	Jahn <i>et al.</i> (2001)
	Ba-30		碱性花岗岩			1.90	759	
	B1-12		碱性花岗岩			2.48	714	杨武斌等(2011)
	B1-3B		碱性花岗岩			0.97	838	
上马场	9832-1	50°21'30", 127°18'15"	碱长花岗岩	106 ± 2	TIMS	0.05	899	
	9832-3		碱长花岗岩			0.19	887	
小山屯	9801-2	49°05'30", 125°12'10"	碱长花岗岩	285 ± 2	TIMS	2.62	836	
固固河	9806-3	49°58'30", 125°24'50"	碱长花岗岩	264 ± 5	TIMS	1.97	872	
大黑山	9843-1	50°14'05", 126°28'10"	碱性花岗岩	292 ± 4	TIMS	4.78	666	Wu <i>et al.</i> (2002)
	9843-6		碱性花岗岩			4.24	710	
松木山	9849-1	49°33'20", 126°50'00"	碱长花岗岩	260 ± 3	TIMS	2.09	859	
碾子山	97Nzs05		碱性花岗岩	125	Rb-Sr 年龄	0.89	846	
	97Nzs32		碱性花岗岩			4.29	568	
	97Nzs39		碱性花岗岩			3.36	645	
白音乌拉			碱性花岗岩	286		5.40		
扎那乌拉			碱性花岗岩	277		4.80		Hong <i>et al.</i> (2004)
组横得楞			碱性花岗岩	284		3.00		
			碱性花岗岩	276		4.30		
松嫩地块西南区 I 型								
龙头山 1	WL60420		二长花岗岩	226 ± 4	TIMS	4.52	633	
	LW97076		二长花岗岩			5.60	545	
	VII07B		花岗闪长岩			3.01	756	
小城子	WL53063		二长花岗岩	111 ± 1	TIMS	-2.89	1141	Liu <i>et al.</i> (2005)
	WL53064		二长花岗岩			-2.39	1100	
	WL53065		二长花岗岩			-1.88	1059	
双井	D106-1		二云母花岗岩	238 ± 3	SHRIMP	-5.28	1434	李锦轶等(2007)
	D103-1		二云母花岗岩			-3.78	1313	
	D98-2		二云母花岗岩			-2.71	1226	
景阳	G0213-2	46°13'34", 121°28'55"	花岗闪长岩	175	LA-ICPMS	5.37	522	
	G0213-5		花岗闪长岩			4.55	588	
青山	G0208-1	46°29'41", 122°07'29"	花岗闪长岩	135	LA-ICPMS	2.73	704	葛文春等(2005a), 周漪等(2011)
	G0208-3		花岗闪长岩			2.88	692	
索伦镇	G0215-1		黑云母花岗岩	125	LA-ICPMS	3.12	664	
	G0215-4	46°36'07", 121°15'23"	黑云母花岗岩			3.40	641	
永和屯	G0206-1	46°29'24", 122°29'13"	二长闪长斑岩	128	LA-ICPMS	2.89	685	
	G0206-2		花岗斑岩			2.11	749	
松嫩地块西南区 A 型								
马鞍子	WL852652		正长花岗岩	149 ± 2	TIMS	4.06	607	
	WL852654		正长花岗岩			5.45	494	
	LW97066		正长花岗岩			4.38	581	
夜来改	WL60422		二长花岗岩	148 ± 1	TIMS	2.01	773	Liu <i>et al.</i> (2005)
	WL60424		二长花岗岩			1.08	849	
	LW97079		二长花岗岩			1.53	812	
龙头山 2	LW97019		正长花岗岩	117 ± 4	TIMS	0.64	860	
	LW97020		正长花岗岩			0.69	855	
查干	G0217-1	46°26'46", 121°29'14"	碱长花岗岩	230	LA-ICPMS	5.51	556	葛文春等(2005a), 周漪等(2011)
	G0217-2		碱长花岗岩			5.93	521	
张广才岭 I 型								
新华屯	X-1		正长花岗岩	184 ± 4	SHRIMP	2.50	753	Wu <i>et al.</i> (2003b)
	X-4		花岗闪长岩			2.90	718	
	X-5		闪长岩			2.10	788	

续表 1

Continued Table 1

岩体	样品号	GPS 坐标	岩性	Age (Ma)	方法	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	资料来源
四楞山*	SLS01-1	44°23'20", 126°16'55"	钾长花岗岩	314 ± 5	TIMS	2.27	888	
天岗*	Tian-1		石英二长岩	175 ± 3	SHRIMP	0.89	886	Wu et al.
	9701-1	43°53'56", 126°55'01"	二长花岗岩			0.91	885	
江蜜蜂	9704-2	43°58'10", 126°43'44"	闪长岩	173 ± 4	SHRIMP	0.74	889	(2000, 2003b, 2011)
白石山	Bai-1	43°34'31", 127°34'22"	花岗闪长岩	196	TIMS	1.64	842	
	9724-1		英云闪长岩			1.65	842	
乌吉密	9747-1	45°12'14", 127°48'13"	二长花岗岩	180 ± 3	SHRIMP	2.09	799	
延寿	9756-1	45°47'26", 128°30'13"	花岗闪长岩	195	SHRIMP	1.75	833	
	9756-3		正长花岗岩			-0.81	1041	
朗乡	9765-1	46°55'42", 128°53'15"	花岗闪长岩	200 ± 2	LA-ICPMS	2.09	814	
团结	9771-1	46°43'00", 128°47'14"	花岗闪长岩	201 ± 3	LA-ICPMS	-0.38	1010	Wu et al. (2000, 2011)
小白	9773-1		二长花岗岩	200		-1.20	1077	
	9773-2		二长花岗岩	200		-0.08	986	
石长*	9776-6		花岗闪长岩	175 ± 2	LA-ICPMS	-1.58	1088	
	9777-2	46°56'17", 128°17'51"	花岗闪长岩			-2.32	1148	
横道河子	Heng-1		二长花岗岩	187		2.50	762	
	H-7		二长花岗岩	187		4.00	640	Wu et al. (2003b)
	97SW009(1)		二长花岗岩	187		1.20	873	
大玉山	9922-2		花岗闪长岩	248 ± 4	TIMS	4.43	658	
	9923-1	43°07'55", 126°28'05"	花岗闪长岩			2.34	829	
	9923-3		花岗闪长岩			2.84	788	
香水园子	9909-3	42°57'15", 125°21'28"	钾长花岗岩	184 ± 3	TIMS	0.3	935	
驿马	97103-1	43°06'05", 126°19'50"	石英闪长岩	170 ± 1	LA-ICPMS	1.8	807	Wu et al.
	97103-2		包体	170 ± 1	LA-ICPMS	0.6	900	(2003b, 2011)
石场屯	9903-1	43°19'50", 124°47'00"	花岗闪长岩	184 ± 2	TIMS	-0.7	1017	
热闹	9908-1		花岗闪长岩	180		-2.9	1197	
石门	9501-1	43°02'31", 128°59'28"	花岗闪长岩	182		-0.10	976	
扇车山	SCS02-1	42°59'25", 126°08'30'	石英闪长岩	164		0.30	927	
	9503-4	42°48'31", 128°13'37"	二长花岗岩	160	Rb-Sr 年龄	-0.99	1027	
东清	9503-5		二长花岗岩			-1.94	1104	Wu et al. (2004a)
	DQ-2		碱长花岗岩			-0.46	984	
一面坡	97SW005	45°05'05", 128°07'32"	花岗闪长岩	183 ± 4	SHRIMP			孙德有等(2005),
虎峰	97SW009	44°55'49", 128°54'38"	二长花岗岩	179 ± 7	SHRIMP			Wu et al. (2011)
舒兰	DY104-2	44°20'18", 126°53'13"	花岗闪长岩	190 ± 2	LA-ICPMS			
张广才岭 A 型								
天桥岗	9715-1		碱长花岗岩	190 ± 2	TIMS	2.34	781	
	9718-1	43°50'54", 126°58'50"	碱长花岗岩			1.34	862	
毛家屯	9757-3		碱性花岗岩	212 ± 2	TIMS	0.25	969	Wu et al. (2002)
	9757-4	46°03'45", 128°59'55"	碱性花岗岩			-1.40	1104	
密林	9767-1	46°31'05", 128°49'51"	碱长花岗岩	197 ± 2	TIMS	-0.16	990	
	9780-1	48°16'28", 129°47'03"	碱长花岗岩	222 ± 5	LA-ICPMS	-1.63	1130	
清水*	9781-1		碱长花岗岩			-0.21	1015	Wu et al. (2002),
	9782-1		碱长花岗岩			-0.66	1051	孙德有等(2004)
白石磊子	Baishi-1	43°28'50", 126°05'23"	碱性花岗岩	123 ± 3	TIMS	2.01	753	Wu et al. (2002)
三道河	9728-1	43°53'37", 127°46'13"	正长花岗岩	216 ± 3	LA-ICPMS			孙德有等(2005)
砬子山	MG-110	42°20'33", 124°45'41"	碱长花岗岩	127 ± 3	SHRIMP			
娄山	MG-42	42°43'24", 125°49'39"	碱长花岗岩	125 ± 4	SHRIMP			
青阳崴子	HP4-1	43°21'37", 126°01'02"	二长花岗岩	124 ± 4	TIMS			Wu et al. (2011)
青林子	FW00-50	43°04'28", 128°33'13"	正长岩	223 ± 1	TIMS			
佳木斯地块 I 型								
楚山	9798-2	45°07'27", 130°02'30"	花岗闪长岩	254 ± 4	SHRIMP	-7.36	1620	
	98119		花岗闪长岩			-7.02	1593	Wu et al. (2000)
柴河	9799-1	44°41'40", 129°41'39"	二长花岗岩	256 ± 5	SHRIMP	-6.84	1579	

续表 1

Continued Table 1

岩体	样品号	GPS 坐标	岩性	Age (Ma)	方法	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	资料来源
青山	98SW119	45°28'52", 130°34'26"	花岗闪长岩	270 ± 4	SHRIMP			Wu <i>et al.</i> (2011)
石场	M9B	45°09'46", 130°41'14"	花岗闪长岩	267 ± 2	SHRIMP			

注: 带* 的岩体由于新旧年龄相差较大, 重新计算了 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$: $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12}$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$; $t_{\text{DM2}} = 1/\lambda_{\text{Sm}} \times \ln \{ 1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{s}} - [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{s}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}}] \times (e^{\lambda t} - 1) - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] \}$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.51315$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2137$; $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CC}} = 0.118$

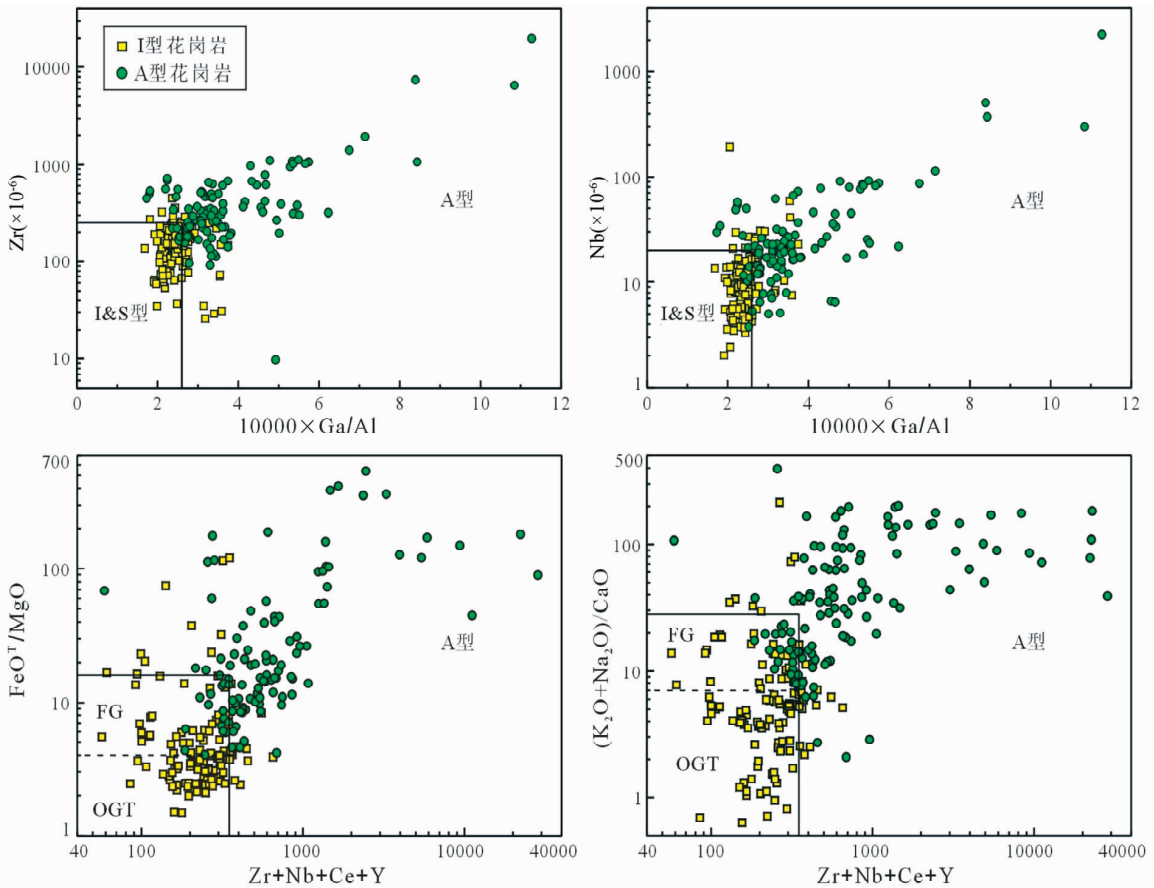


图 2 东北晚古生代-中生代花岗岩分类判别图(据 Whalen *et al.*, 1987)

数据来源于表 1 所引文献及 Wu *et al.* (2003a) 和曾涛等(2011); FG 为分异的 I 或 S 型花岗岩, OGT 为未分异的 I 或 S 型花岗岩

Fig. 2 Zr, Nb vs. $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}$ and $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$, $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}$ vs. $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Y} + \text{Ce}$ classification diagrams (after Whalen *et al.*, 1987) of the Late Paleozoic to Mesozoic granites in NE China

Data sources are from Table 1, Wu *et al.* (2003a) and Zeng *et al.* (2011). FG = fractionated I- and S-type felsic granites; OGT = unfractionated I- and S-type granites

程度的重叠(图 2), 尤其是成分高度演化的花岗岩。一方面, 花岗岩体的 Ga/Al 比值可随岩浆分异而升高, 使高度分异的 I 型或 S 型花岗岩和 A 型花岗岩难以区别; 另一方面, A 型花岗岩经历强烈的分离结晶作用也会导致特征性的微量元素含量急剧降低, 如锆石分离结晶可致岩浆的 Zr 含量降至 250×10^{-6} 以下, 表现高分异 I 型花岗岩的特点(King *et al.*, 1997)。因此除了利用判别图解来区分花岗岩类型外, 前人还通过对比岩体的野外产状、岩石组合类型、岩相学特

征、侵位年龄和岩浆熔融/冷却结晶温度等综合信息来判断成分特征具有重叠性的花岗岩(King *et al.*, 1997; Wu *et al.*, 2002, 2003a, 2004a; 齐成栋等, 2003)。如巴尔哲岩体因含有碱性暗色矿物而定为 A 型花岗岩(Jahn *et al.*, 2001; 杨武斌等, 2011); 东清和香水园子岩体由于其出露区域存在同时代的 I 型花岗岩而定为高分异 I 型花岗岩(Wu *et al.*, 2004a)。而卧都河、大石寨岩体受晚期水-岩反应的影响, 原始成分难以确定(Jahn *et al.*, 2001; 周漪等, 2011), 且缺少

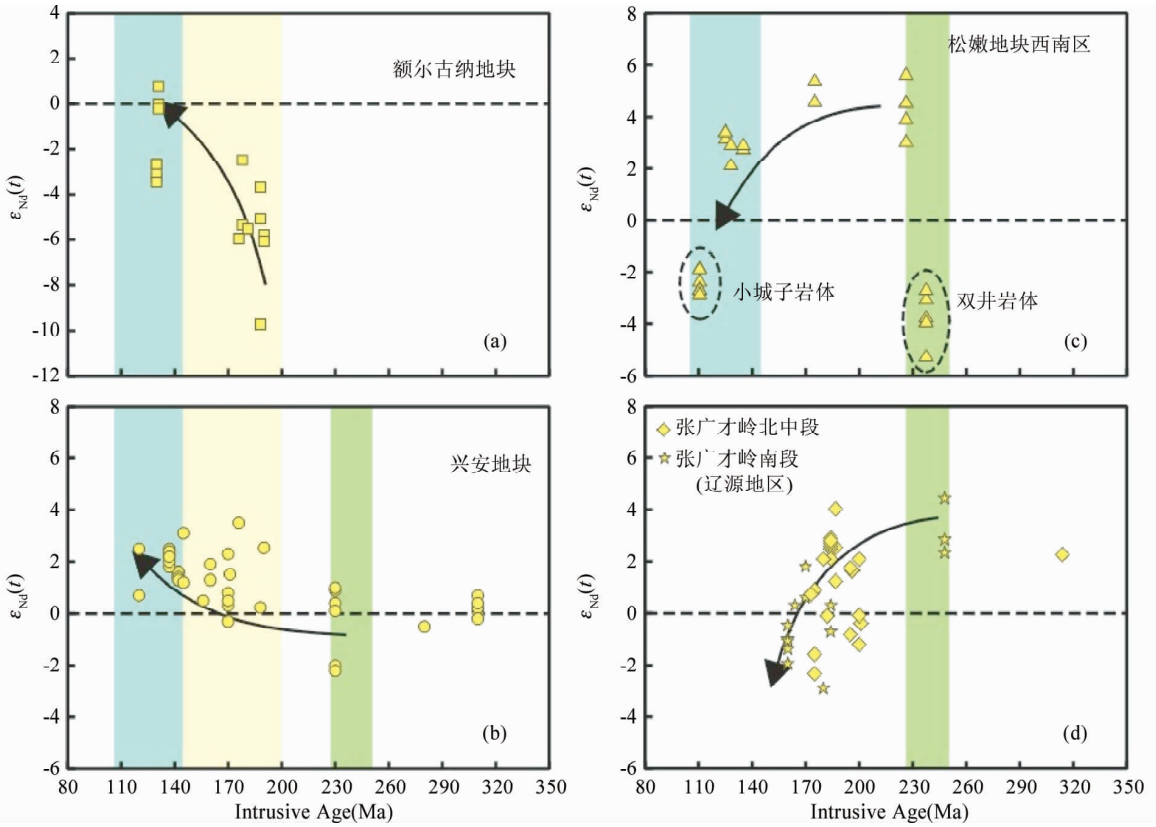


图3 东北地区晚古生代-中生代I型花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. 侵入年龄图(数据来源见表1)

Fig. 3 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. intrusive age plots of Late Paleozoic to Mesozoic I-type granites in NE China (data sources are from Table 1)

其他辅助证据,在此不予讨论。

受限于早期的实验条件,一些岩体早期发表的年龄资料不准确,如喇嘛山岩体全岩 Rb-Sr 年龄为 154Ma (Wu *et al.*, 2003a),新的锆石 U-Pb 年龄为 142 ± 3 Ma (Wu *et al.*, 2011);清水岩体全岩 Rb-Sr 年龄为 196 ± 4 Ma (Wu *et al.*, 2002),新的锆石 U-Pb 年龄为 222 ± 5 Ma (孙德有等,2004)。为更准确地反映花岗岩的 Nd 同位素组成变化趋势,本文采用最近发表的锆石 U-Pb 年龄,并采用统一重新计算的 t_{DM2} 来估计区域地壳的增生时间。

4 东北地区晚古生代-中生代花岗岩 Nd 同位素组成的时空变化

4.1 额尔古纳地块

该区 Nd 同位素数据来自早-中侏罗世(190~170Ma)和早白垩世(140~120Ma)的I型花岗岩, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化范围为 $-9.7 \sim +0.8$,尽管缺少中-晚侏罗世的资料,但整体仍呈现出随时代变新花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值逐渐增加的趋势(图3a),额尔古纳地块中生代花岗岩的二阶段 Nd 模式年龄主要为 0.86~1.50Ga。而额尔古纳地块中生代花岗岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于 $-3.9 \sim +11.6$,二阶段 Hf 模式年龄为 0.47~1.60Ga (隋振民等,2007;张彦龙等,2008)。早古生代(460~500Ma)花岗岩的

锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值集中在 $+1.5 \sim +3.8$,二阶段 Hf 模式年龄为 1.1~1.4Ga (葛文春等,2007)。锆石 Hf 同位素和全岩 Nd 同位素的特征显示额尔古纳地块花岗岩的原岩存在中-新元古代古老地壳物质。这些古老地壳组分随时代变新进入岩浆的比例逐渐减少,源区中新生年轻地壳的贡献增加。

值得注意的是,具有早古生代年龄的察哈彦、十八站、内河、白银纳、查拉班河岩体(葛文春等,2007)的出露区也正好是隋振民等(2007)、隋振民和徐学纯(2010)对额尔古纳地块早-中侏罗世花岗岩的研究区。隋振民等(2007)获得的侏罗纪花岗岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 $-2.8 \sim +11.6$,二阶段 Hf 模式年龄为 0.47~1.60Ga,认为其源区物质可能同时来自新元古代和显生宙两个时期的增生地壳。此研究区恰好位于额尔古纳地块及兴安地块的结合处,深大断裂(如塔源-喜桂图断裂带)为岩浆提供上升通道(Clemens and Mawer, 1992; Hutton and Reavy, 1992),有利于多期次岩浆活动的发生;而古生代-中生代期间东北地区的碰撞造山运动也极有可能激活了断裂带处的岩石圈地幔甚至更深部的岩浆,岩浆随后沿构造薄弱位置上升并侵入到地壳引发部分熔融,形成高 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和低 t_{DM2} 的花岗岩。虽然这些侏罗纪花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值偏低,但全岩 Nd 同位素成分是岩石的混合平均成分,而锆石的原位 Hf 同位素组成则可能保留了显生宙地壳增生的记录。

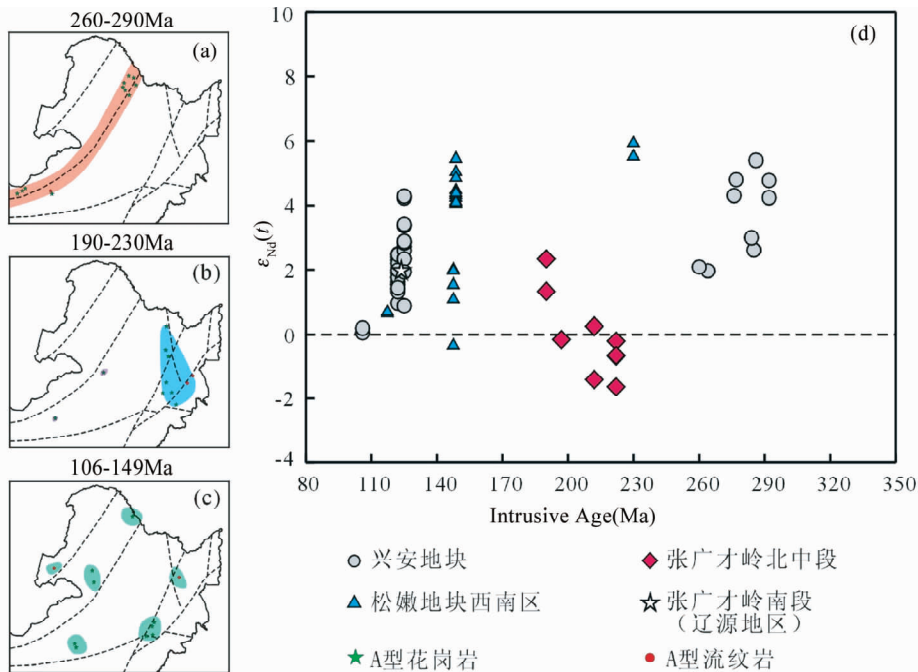


图4 东北地区晚古生代-中生代 A 型花岗岩(包括少量具 A 型花岗岩特质的流纹岩)的空间分布图(a-c)和 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. 侵入年龄图(d)

数据来源于表 1 及葛文春等(2001), Zhang *et al.* (2008), Xu *et al.* (2009), Sun *et al.* (2013)

Fig.4 Spatial distribution diagrams of A-type granites (including some A-type affinity rhyolite) in three different periods (a-c) and $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. intrusive age plot (d) of Late Paleozoic to Mesozoic A-type granites in NE China

Data sources are from Table 1 and Ge *et al.* (2001), Zhang *et al.* (2008), Xu *et al.* (2009) and Sun *et al.* (2013)

4.2 兴安地块

兴安地块的花岗岩岩浆作用期包括石炭纪的 I 型花岗岩期、二叠纪 A 型花岗岩期、中侏罗世及早白垩世(Wu *et al.*, 2011), 均有相应年龄的花岗岩同位素数据(图 3b、图 4)。该区 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 $-2.2 \sim +5.4$, 二阶段 Nd 模式年龄为 $0.57 \sim 1.18$ Ga。中生代岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值总体大于 0, 且 $t_{DM2} < 1.0$ Ga。兴安地块的花岗岩显示出与额尔古纳地块不同的 Nd 同位素特征, 表现为较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和偏低的 t_{DM2} 。由二阶段 Nd 模式年龄显示的兴安地块地壳增生作用主要发生在新元古代-显生宙, 晚于额尔古纳地块的中-新元古代, 两个地块的早期地壳演化过程并不相同, 属于不同的区域构造单元(葛文春等, 2007; 隋振民等, 2007; 张彦龙等, 2008)。

石炭纪和三叠纪 I 型花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值在 0 左右, 早-中侏罗世至早白垩世 I 型花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值持续上升。另外, 新开岭地区的 I 型花岗岩, 早白垩世(106 ~ 128 Ma) 的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值总体略高于中-晚侏罗世(164 ~ 188 Ma) 的(曾涛等, 2011), 与兴安地块同期 I 型花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值随时间变化的特征一致。类似地, 兴安地块的中生代 I 型花岗岩也显示了 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值随侵位时间变年轻而增加, 源区中年轻地壳物质所占比例递增的特点。

兴安地块还存在晚二叠世和早白垩世两期 A 型花岗岩,

$\epsilon_{Nd}(t)$ 值均大于 0, 晚二叠世 A 型花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值随时间演化有降低的趋势, 但总体上晚二叠世 A 型花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较早白垩世的高(图 4d)。

4.3 松嫩地块西南区

该区数据来自林西、双井及乌兰浩特三地, 花岗岩年龄分布于中三叠世、中侏罗世和早白垩世。双井、小城子岩体的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值明显小于 0, 野外观察与同位素特征表明这两个岩体的源区应该含有较高比例的古生代俯冲增生楔杂岩, 如变质的远洋沉积物(Liu *et al.*, 2005; 李锦铁等, 2007)。除双井、小城子岩体外, 其他 I 型花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值随时间变新呈下降的趋势(图 3c), 二阶段 Nd 模式年龄为 $0.52 \sim 0.76$ Ga, 反映熔融源区主要为年轻地壳。A 型花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值均为正值(图 4d), 二阶段 Nd 模式年龄为 $0.52 \sim 0.97$ Ga, 随时间的变化特征和 I 型花岗岩相同, 说明其源区来自古老地壳物质的比例少。松嫩地块西南区花岗岩的模式年龄总体偏小, 且沿贺根山-黑河断裂出露一些 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值高且正的中生代酸性火成岩(Liu *et al.*, 2005; Guo *et al.*, 2009; 周漪等, 2011), 反映该区地壳增生作用可能一直延续到中生代。

4.4 张广才岭地区

张广才岭地区出现了多期中生代花岗质岩浆作用。由

于南北花岗岩存在时代、类型和同位素组成的差异,本文将张广才岭分作北中段和南段,北中段主要指靠近佳木斯地块西缘的松嫩地块,南段包括张广才岭靠近西拉木伦-长春缝合带的区域以及部分延边地区。

北中段 I 型花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于 $-2.3 \sim +4.0$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值随时间变新逐渐降低,二阶段 Nd 模式年龄为 $0.64 \sim 1.15\text{Ga}$;南段 I 型花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化趋势、 t_{DM2} 和北中段都比较一致(图 3d)。南段辽源地区的大玉山岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 $+2.3 \sim +4.4$,高于呼兰群变质杂岩体的 $-1.2 \sim -0.7$,显示新生地壳的特征(Wu *et al.*, 2007)。张广才岭全区早中生代 I 型花岗岩 Nd 同位素变化特征与松嫩地块西南区相似。

张广才岭地区还分布着两期 A 型花岗岩:晚三叠世-早侏罗世(223~182Ma) A 型花岗岩集中在北中段,如清水、毛家屯、三道河、密林和天桥岗岩体(Wu *et al.*, 2002; 孙德有等, 2005)。该区 A 型花岗岩有较多的负 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,应为古老地壳物质通过岩浆作用发生了再循环(Guo *et al.*, 2010); $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值随时间变新而呈上升趋势(图 4d),则表示中生代以来的岩浆作用一直有年轻地壳组分的贡献。初步分析认为晚三叠世-早侏罗世 A 型花岗岩可能受松嫩、佳木斯-兴凯地块于早中生代碰撞的影响,岩浆源区含有陆间洋盆的远洋沉积物,故与其他地块或同区白垩纪 A 型花岗岩的 Nd 同位素组成不同。早白垩世($\sim 125\text{Ma}$) A 型花岗岩则在南段,如白石磊子、青阳崴子、砬子山和娄山岩体等(Wu *et al.*, 2002, 2011)。该区 A 型花岗岩 Nd 同位素的报道仅白石磊子岩体一例, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $+2.0$,与东北地区白垩纪花岗岩的平均值相当。

4.5 佳木斯-兴凯地块

佳木斯-兴凯地块在晚古生代-中生代同样有多次火成岩事件,尤其是中-晚二叠世的 I 型花岗岩,岩浆作用持续时间长而且广泛分布于佳木斯地块的中南部地区。已有数据显示这期花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值很低($-7.36 \sim -6.84$),二阶段 Nd 模式年龄约 1.60Ga 。少量同期花岗岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 -3.2 到 -0.1 之间,二阶段 Hf 模式年龄为 $1.35 \sim 1.40\text{Ga}$ (Cui *et al.*, 2013)。另外,麻山群中经历麻粒岩相变的形成年龄约 500Ma 的花岗岩,其 Nd 同位素的 t_{DM2} 也为古-中元古代年龄(Wu *et al.*, 2000)。综合证据表明佳木斯地块的结晶基底偏老。

5 对区域构造演化的启示

5.1 兴安地块的晚古生代花岗质岩浆作用

兴安地块及邻区存在多个石炭纪(340~300Ma) I 型花岗质岩体(Chen *et al.*, 2000; 刘建峰等, 2009; Wu *et al.*, 2011),岩体岩石组合以钾长花岗岩、二长花岗岩和花岗闪长岩为主,成分具有岛弧岩浆特征。在额尔古纳地块塔河发育

了 333Ma 的堆晶辉长岩,反映在额尔古纳和兴安地块早古生代拼合之后区域上仍存在幔源岩浆活动(Ge *et al.*, 2005b; 周长勇等, 2005)。这些辉长岩与 I 型花岗岩究竟形成于造山后陆内伸展环境或是古亚洲洋俯冲作用的产物还存在不同观点(Tang, 1990; Chen *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2003; 周长勇等, 2005),需要更多的证据给予佐证。兴安地块二叠纪 A 型花岗岩沿着贺根山-黑河断裂延伸(图 4a),形成时代从 290Ma 到 260Ma (Wu *et al.*, 2002; Shi *et al.*, 2004; Hong *et al.*, 2004),暗示区域至少在二叠纪之前已经进入造山期后伸展环境。

相对于中生代 I 型花岗岩,兴安地块及邻区晚古生代 I 型花岗岩总体上低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(图 3b),反映其熔融源区含有更多的古老地壳组分。随着造山带全面进入到伸展环境并伴随软流圈地幔物质上涌,底侵岩浆携带的热量熔融底部首先形成的增生地壳,产出 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值较高的 A 型花岗岩,此过程持续到后期时,下地壳残留的难熔物质比例增加,熔融源区向上扩张至以长英质易熔物质为主的中、上地壳, A 型花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值逐渐降低。引发拉张伸展环境的动力学机制可能与沿贺根山-黑河断裂俯冲的板片的断离作用有关(Wu *et al.*, 2002)。

在佳木斯地块的中南部还分布了一些 $250 \sim 270\text{Ma}$ 的 I 型花岗岩,可能是古亚洲洋俯冲作用背景下的佳木斯地块和兴凯地块沿敦密断裂带缝合的产物(Meng *et al.*, 2008)。

5.2 松嫩地块的早-中中生代花岗质岩浆作用

松嫩地块西南区和张广才岭南段靠近西拉木伦-长春断裂,该断裂带作为华北板块和西伯利亚板块最终缝合的位置已获得普遍认可,但缝合的时间仍存在较大争议(Tang, 1990; 徐备和陈斌, 1997; Chen *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2003; Li, 2006; Wu *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2013)。然而沿西拉木伦-长春断裂分布着一些与幔源岩浆活动相关的早中生代岩体,如吉林省中东部的晚三叠世镁铁质-超镁铁质岩(Wu *et al.*, 2004b)和华北克拉通北缘的三叠纪碱性侵入岩带(阎国翰等, 2000; Zhang *et al.*, 2009),我们倾向于认为靠近该缝合带的区域在早中生代的岩浆活动仍属于古亚洲洋构造域的演化。松嫩地块西南区和张广才岭南段的花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值随年龄变新而逐渐降低(图 3),其岩浆作用机制应该与前述晚古生代花岗岩成因相似。由于前期古亚洲洋闭合、陆陆碰撞导致陆壳物质叠置加厚,下地壳在高压变质作用下密度增大并由于重力不稳而发生拆沉,上涌的软流圈物质底侵下地壳(Wu *et al.*, 2002),从而形成早期高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 中酸性岩浆。随着幔源岩浆侵位的减弱,底侵幔源岩浆提供的热量不足以熔融残留的陆壳物质,从而导致叠置加厚的地壳易熔组分(如变沉积岩)逐渐进入后期的花岗质岩浆中,故花岗岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值都随时间变新而逐渐下降。

张广才岭北中段发育大量晚三叠世-早侏罗世 A 型花岗岩和早侏罗世 I 型花岗岩(Wu *et al.*, 2002, 2003a; 孙德有

等, 2005)。近年来, 黑龙江变质杂岩系中的云母片岩变质年龄和蓝片岩碎屑锆石年龄, 限定佳木斯-兴凯地块和松嫩地块之间洋壳的俯冲作用期为晚三叠世-早侏罗世, 二者最终拼合时间约在早侏罗世 (Zhou and Wilde, 2013), 也说明古太平洋俯冲板块开始影响中国东北地区。而晚三叠世的 A 型花岗岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 明显小于 0, 说明早期的岩浆源区中远洋沉积物或其变沉积岩的贡献可能较大 (Guo *et al.*, 2010)。因此推测张广才岭该期花岗岩的形成与松嫩地块、佳木斯-兴凯地块于早中生代碰撞拼合的事件有密切关系, A 型花岗岩是碰撞后伸展环境的产物。该区 A 型花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 呈持续上升的趋势而不同于兴安地块、松嫩地块西南区 A 型花岗岩的变化规律 (图 4d), 可能与碰撞后伸展作用下新生幔源底侵岩浆的贡献有关, 使该区 A 型花岗岩原岩中新生地壳物质的比例逐渐提高。

5.3 大兴安岭北部的侏罗纪花岗质岩浆作用

位于东北地区内陆的兴安地块和额尔古纳地块也发育大量 145 ~ 190Ma 的 I 型花岗岩。但不同于张广才岭地区的是, 北大兴安岭和亚洲大陆东缘的水平距离近 2000km (Fan *et al.*, 2003), 而且侏罗纪东北亚区太平洋壳俯冲作用主要是法拉隆 (Farralon) 板块的侧向运动 (Maruyama and Seno, 1986), 难以理解古太平洋俯冲板块能够作用于内陆腹地并引起岩浆活动。另外有研究指出蒙古-鄂霍茨克洋的缝合早于 170Ma (Tomurtogoo *et al.*, 2005), 与北大兴安岭侏罗纪花岗岩的形成时代十分接近。因此有学者认为北大兴安岭侏罗纪花岗岩的成因和蒙古-鄂霍茨克洋闭合导致华北-蒙古板块和西伯利亚板块碰撞的事件有关 (Fan *et al.*, 2003)。由于造山带垮塌、软流圈上涌的幔源熔体或蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲交代地幔楔熔体加入引起地壳增生, 表现为额尔古纳和兴安地块 I 型花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值逐渐上升。随着早白垩世东北整个区域进入古太平洋俯冲作用的伸展环境, 额尔古纳地块和兴安地块的早白垩世花岗岩活动也受此事件影响。

5.4 早白垩世花岗质岩浆作用

古太平洋板块俯冲作用从侏罗纪开始影响中国东北地区, 晚侏罗世-早白垩世期间区域上由挤压环境转变到伸展环境, 至早白垩世出现 A 型花岗岩 (图 4c) (Jahn *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2002; 林强等, 2004; Liu *et al.*, 2005) 和盆岭构造格局 (Fan *et al.*, 2003; Meng, 2003)。索伦镇岩体 (周漪等, 2011) 和洛古河岩体 (武广等, 2009)、小城子岩体 (Liu *et al.*, 2005), 可能受到区域幔源岩浆或古老地壳物质的影响, 形成的花岗岩显示过于亏损或富集的 Nd 同位素组成。而东北全区内其他白垩纪花岗岩类的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值集中在 0 ~ +3 之间 (Jahn *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2002, 2003b; Liu *et al.*, 2005; 张彦龙等, 2008; 李红霞等, 2012), 同期流纹岩的 Nd 同位素组成也具有这一特点 (Fan *et al.*, 2003; Sun *et al.*, 2013), 说明在古太平洋板块俯冲导致的伸展环境下

底侵的幔源岩浆熔融了源区中的年轻地壳组分, 同时可能也表明早白垩世东北地区的中、下地壳 Nd 同位素组成趋于一致, 整体受古太平洋构造体系影响。

另外, 不同构造演化事件可导致同区域 A 型花岗岩的 Nd 同位素组成存在差异, 如兴安地块北部上马场岩体 (106Ma) 和同区二叠纪的 A 型花岗岩, 以及张广才岭地区白石磊子岩体 (123Ma) 和晚三叠世-早侏罗世的 A 型花岗岩, 可能与地壳结构组成变化和熔融深度相关。

5.5 东北地区显生宙地壳增生作用

晚古生代-中生代花岗岩的 Nd 模式年龄 t_{DM2} 和侵位年龄的特征 (图 5) 显示, 额尔古纳地块、佳木斯地块和华北北缘的数据主要为 $t_{\text{DM2}} > t + 1000\text{Ma}$, 指示区域下地壳具有非常古老的结晶基底; 在松嫩地块西南区, 侵入碰撞增生杂岩带的小城子、双井岩体的 t_{DM2} 也偏老, 说明源区存在远洋沉积物等再循环地壳物质。这些地区花岗岩的原始岩浆中古老再循环地壳物质的比例大。而 t_{DM2} 和侵位年龄差值小于 300Ma 的花岗岩则极少, 仅查干岩体编号为 G0217-2 的碱长花岗岩 t_{DM2} 与侵位年龄相差 290Ma。兴安地块、松嫩地块西南区和张广才岭花岗岩的 t_{DM2} 和侵位年龄差值集中在 300 ~ 1000Ma, 反映了不同属性 (年轻 vs. 古老) 的地壳物质对熔融源区的贡献。

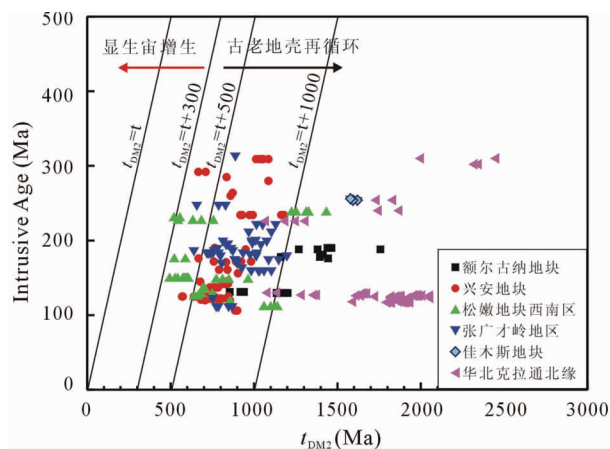


图 5 东北地区和华北克拉通北缘晚古生代-中生代花岗岩 t_{DM2} vs. 侵位年龄图 (据 Hargrove *et al.*, 2006)

东北地区数据来源于表 1 和李红霞等 (2012); 华北北缘数据来源于 Yang *et al.* (2008), Zhang *et al.* (2009) 和 Pei *et al.* (2011)

Fig. 5 Plot of t_{DM2} (Nd two-stage model age) vs. intrusive age of Late Paleozoic to Mesozoic granites from NE China and northern margin of North China Craton (after Hargrove *et al.*, 2006)

Data of NE China are from Table 1 and Li *et al.* (2012b); data of northern margin of North China are from Yang *et al.* (2008), Zhang *et al.* (2009) and Pei *et al.* (2011)

由花岗岩 Nd 同位素组成反映的信息,东北地区晚古生代-中生代的地壳增生作用具有分带性。额尔古纳和兴安地块 I 型花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随着年龄变新而增大,显示了新生地壳物质的加入,推测与区域上造山作用结束后伸展期上涌的幔源熔体或蒙古-鄂霍茨克洋俯冲相关的新生弧岩浆加入地壳相关。部分花岗岩的高 t_{DM2} 则是继承了原岩中古老地壳的性质。

松嫩地块西南区和张广才岭 I 型花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随着年龄变新而下降,反映花岗岩的熔融源区有从早期的新生岛弧中、下地壳向晚期含更多再循环物质(如远洋沉积物)的中、上地壳迁移的趋势。最主要的地壳增生方式可能为俯冲导致的侧向增生作用,即通过俯冲改造的地幔楔熔融形成年轻的弧壳,这些具有不同组成的弧壳岩石和上覆的沉积物或增生楔共同构成了花岗岩的熔融源区。

形成于高温贫水环境的 A 型花岗岩,其成因与岩石圈伸展背景下的底侵幔源岩浆有直接联系。除张广才岭北中段 of 的 A 型花岗岩在一定程度上受到俯冲沉积物的影响,东北全区其他 A 型花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 整体较高,显示出新生地壳的特征(图 4d)。

6 主要认识

根据我们对东北地区晚古生代-中生代 I 型和 A 型花岗岩的资料收集、整理和综合分析,获得了如下认识:

(1) 区域上的 I 型花岗岩有两种 Nd 同位素变化趋势:额尔古纳和兴安地块的 I 型花岗岩, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随时间变新而递增,推测是与造山带垮塌、软流圈上涌的幔源熔体或蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲增生作用相关。松嫩地块西南区和张广才岭地区的 I 型花岗岩, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 随时间变新而递减,反映花岗岩的熔融源区有从早期的新生岛弧中、下地壳向晚期含更多再循环物质(如远洋沉积物或其变沉积岩)的中、上地壳迁移的趋势。除张广才岭北中段的 A 型花岗岩可能受到俯冲沉积物的影响,东北全区其他 A 型花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 整体较高(图 4d),显示出新生地壳的特征。

(2) 东北地区主要发育了三期 A 型花岗岩,代表三次重要的岩石圈伸展事件。二叠纪 A 型花岗岩沿贺根山-嫩江-黑河断裂延伸,该期 A 型花岗岩可能是兴安地块和松嫩地块碰撞拼合后伸展环境的产物。晚三叠世-早侏罗世 A 型花岗岩主要分布于张广才岭一带,受松嫩地块、佳木斯-兴凯地块碰撞拼合事件的影响。早白垩世 A 型花岗岩,指示了与太平洋俯冲、后撤相关的区域性伸展环境。

(3) 除几个特殊岩体,早白垩世东北地区酸性火成岩的 Nd 同位素组成相近, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值集中在 0 ~ +3 之间,可能暗示已经整体转换至古太平洋构造体系的东北地区的中、下地壳或岩石圈底部的成分组成趋于一致。

(4) 东北地区显著的地壳增生作用主要发生在缝合带和岩石圈规模的断裂带,底部幔源岩浆沿断裂带上升到地壳不

同深度并导致地壳增生,随后形成高 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和低 t_{DM2} 的中酸性火成岩,如塔源-喜桂图断裂上位于大兴安岭北段的韩家园子地区以及贺根山-黑河断裂上位于大兴安岭中南段的霍林河区域。

References

- Armstrong RL. 1991. The persistent myth of crustal growth. *Aust. J. Earth Sci.*, 38(5): 613–630
- Chen B, Jahn BM, Wilde SA and Xu B. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China; Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328(1–2): 157–182
- Cheng RY, Wu FY, Ge WC, Sun DY, Liu XM and Yang JH. 2006. Emplacement age of the Raohe Complex in eastern Heilongjiang Province and the tectonic evolution of the eastern part of Northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 353–376 (in Chinese with English abstract)
- Clemens JD and Mawer CK. 1992. Granitic magma transport by fracture propagation. *Tectonophysics*, 204(3–4): 339–360
- Cui PL, Sun JG, Han SJ, Zhang P, Zhang Y, Bai LA and Gu 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. *Inter. Geol. Rev.*, 55(9): 1109–1125
- 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(1–2): 115–135
- Ge WC, Li XH, Lin Q, Sun DY, Wu FY and Yin XC. 2001. Geochemistry of Early Cretaceous alkaline rhyolites from Hulun Lake, Daxing'anling and its tectonic implications. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 176–183 (in Chinese with English abstract)
- Ge WC, Wu FY, Zhou CY and Zhang JH. 2005a. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749–762 (in Chinese with English abstract)
- Ge WC, Wu FY, Zhou CY and Abdel Rahman AA. 2005b. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Erguna block in the northern part of the Da Hinggan Mts. *Chin. Sci. Bull.*, 50(18): 2097–2105
- Ge WC, Sui ZM, Wu FY, Zhang JH, Xu XC and Cheng RY. 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern Da Hinggan Mts., northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 423–440 (in Chinese with English abstract)
- Guo F, Nakamura E, Fan WM, Kobayoshi K and Li CW. 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing, Yanji Area, NE China. *J. Petrol.*, 48(4): 661–692
- Guo F, Fan WM, Li CW, Gao XF and Miao LC. 2009. Early Cretaceous highly positive ε_{Nd} felsic volcanic rocks from the Hinggan Mountains, NE China: Origin and implications for Phanerozoic crustal growth. *Inter. J. Earth Sci.*, 98(6): 1395–1411
- Guo F, Fan WM, Gao XF, Li CW, Miao LC, Zhao L and Li HX. 2010. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Mesozoic igneous rocks in NE China: Constraints on tectonic framework and Phanerozoic crustal growth. *Lithos*, 120(3–4): 563–578
- Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chem. Geol.*, 138(3–4): 135–159
- Hargrove US, Stern RJ, Kimura JI, Manton WI and Johnson PR. 2006. How juvenile is the Arabian-Nubian shield? Evidence from Nd isotopes and pre-Neoproterozoic inherited zircon in the Bi'r Umq suture zone, Saudi Arabia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 252(3–4): 308–326

- Hong DW, Zhang JS, Wang T, Wang SG and Xie XL. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: Evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *J. Asian Earth Sci.*, 23(5): 799-813
- Hutton DHW and Reavy RJ. 1992. Strike-slip tectonics and granite petrogenesis. *Tectonics*, 11(5): 960-967
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23: 82-92
- Jahn BM, Wu FY, Capdevila R, Martineau F, Zhao ZH and Wang YX. 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 59(4): 171-198
- King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *J. Petrol.*, 38(3): 371-391
- Li H. 2012. Jurassic magmatic evolution process and prospecting potential in Dasuoerzhugou region of the northern Great Xing'an Range. Master Degree Thesis. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English summary)
- Li HX, Guo F, Li CW and Zhao L. 2012. Petrogenesis of Early Cretaceous tonalites from the Xiaoxinancha Au-Cu deposit. *Geochimica*, 41(6): 497-514 (in Chinese with English abstract)
- 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(3-4): 207-224
- Li JY, Gao LM, Sun GH, Li YP and Wang YB. 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-plate. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565-582 (in Chinese with English abstract)
- Lin Q, Ge WC, Wu FY, Sun DY and Cao L. 2004. Geochemistry of Mesozoic granites in Da Hinggan Ling ranges. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 403-412 (in Chinese with English abstract)
- Liu JF, Chi XG, Zhang XZ, Ma ZH, Zhao Z, Wang TF, Hu ZC and Zhao XY. 2009. Geochemical characteristics of Carboniferous quartz-diorite in the southern Xiwuqi area, Inner Mongolia and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 365-376 (in Chinese with English abstract)
- Liu W, Siebel W, Li XJ and Pan XF. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: Constraints on basaltic underplating. *Chem. Geol.*, 219(1-4): 5-35
- Maruyama S and Seno T. 1986. Orogeny and relative plate motions: Example of the Japanese islands. *Tectonophysics*, 127(3-4): 305-329
- Meng E, Xu WL, Yang DB, Pei FP, Ji WQ, Yu Y and Zhang XZ. 2008. Permian volcanisms in eastern and southeastern margins of the Jiamusi Massif, northeastern China: Zircon U-Pb chronology, geochemistry and its tectonic implications. *Chinese Sci. Bull.*, 53(8): 1231-1245
- Meng QR. 2003. What drove Late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369(3-4): 155-174
- Pei FP, Xu WL, Yang DB, Yu Y, Meng E and Zhao QG. 2011. Petrogenesis of Late Mesozoic granitoids in southern Jilin Province, northeastern China: Geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Pb isotopic evidence. *Lithos*, 125(1-2): 27-39
- Qi CD, Ji CH, Han J and Nie LJ. 2003. The geologic features of the Late Triassic alkali-meta alkali intrusive complex body of the Dunhua area, Jilin Province and its structural setting. *Jilin Geology*, 22(3): 12-18 (in Chinese with English abstract)
- Sengör AMC, Natal' in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299-307
- Shi GH, Miao LC, Zhang FQ, Jian P, Fan WM and Liu DY. 2004. Emplacement age and tectonic implications of the Xilinhot A-type granite in Inner Mongolia, China. *Chin. Sci. Bull.*, 49(7): 723-729
- Sui ZM, Ge WC, Wu FY, Zhang JH, Xu XC and Cheng RY. 2007. Zircon U-Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northwestern part of the Da Hinggan Mts. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 461-480 (in Chinese with English abstract)
- Sui ZM and Xu XC. 2010. Sr-Nd isotopic characteristics of Jurassic granites in northeastern Da Hinggan Mountains and their geological implications. *Geology in China*, 37(1): 48-55 (in Chinese with English abstract)
- Sun DY, Wu FY and Gao S. 2004. LA-ICPMS zircon U-Pb age of the Qingshui pluton in the East Xiao Hinggan Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(2): 213-218 (in Chinese with English abstract)
- Sun DY, Wu FY, Gao S and Lu XP. 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 the East Jilin-Heilongjiang area, China. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 263-275 (in Chinese with English abstract)
- Sun MD, Chen HL, Zhang FQ, Wilde SA, Dong CW and Yang SF. 2013. A 100Ma bimodal composite dyke complex in the Jiamusi Block, NE China: An indication for lithospheric extension driven by Paleo-Pacific roll-back. *Lithos*, 162-163: 317-330
- Tang KD. 1990. Tectonic development of Paleozoic foldbelts at the north margin of the Sino-Korean craton. *Tectonics*, 9(2): 249-260
- Tang KD, Wang Y, He GQ and Shao JA. 1995. Continental margin structure of Northeast China and its adjacent areas. *Acta Geologica Sinica*, 69(1): 16-30 (in Chinese with English abstract)
- Tomurtogoo O, Windley BF, Kroner A, Badarch G and Liu DY. 2005. Zircon age and occurrence of the Adaatsag ophiolite and Muron shear zone, central Mongolia: Constraints on the evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean, suture and orogen. *J. Geol. Soc. Lond.*, 162(1): 125-134
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95(4): 407-419
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA and Sun DY. 2000. Phanerozoic continental crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1-2): 89-113
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde SA. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem. Geol.*, 187(1-2): 143-173
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003a. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66(3-4): 241-273
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003b. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): Isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3-4): 191-204
- Wu FY, Sun DY, Jahn BM and Wilde SA. 2004a. A Jurassic garnet-bearing granitic pluton from NE China showing tetrad REE patterns. *J. Asian Earth Sci.*, 23(5): 731-744
- Wu FY, Wilde SA, Sun DY and Zhang GL. 2004b. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu, Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China. *J. Asian Earth Sci.*, 23(3): 781-797
- Wu FY, Zhao GC, Sun DY, Wilde SA and Yang JH. 2007. The Hulan Group: Its role in the evolution of the central Asian Orogenic Belt of NE China. *J. Asian Earth Sci.*, 30(3-4): 542-556
- Wu FY, Sun DY, Ge WC, Zhang YB, Grant ML, Wilde SA and Jahn BM. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *J. Asian Earth Sci.*, 41(1): 1-30
- Wu G, Chen YJ, Zhao ZH, Zhao TP, Li ZT and Zhang Z. 2009. Geochemistry, zircon SHRIMP U-Pb age and petrogenesis of the East Luoguhe granites at the northern end of the Great Hinggan Range. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 233-247 (in Chinese with English abstract)
- 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
- Xu B and Chen B. 1997. The structure and evolution of a Middle-Paleozoic orogenic belt between the North China and Siberian Blocks, northern Inner Mongolia, China. *Science in China (Ser.*

- D), 27(3): 227–232 (in Chinese)
- Xu B, Charvet J, Chen Y, Zhao P and Shi GZ. 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Res.*, 23(4): 1342–1364
- Xu WL, Ji WQ, Pei FP, Meng E, Yu Y, Yang DB and Zhang XZ. 2009. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China; Chronology, geochemistry, and tectonic implications. *J. Asian Earth Sci.*, 34(3): 392–402
- Yan GH, Mu BL, Xu BL, He GQ, Tan LK, Zhao H, He ZF, Zhang RH and Qiao GS. 2000. Chronology and Sr, Nd, Pb isotopic features of Triassic alkaline intrusive rocks in Yanliao-Yinshan and their significance. *Science in China (Ser. D)*, 30(4): 383–387 (in Chinese)
- Yang JH, Wu FY, Wilde SA, Chen FK, Liu XM and Xie LW. 2008. Petrogenesis of an alkali syenite-granite-rhyolite suite in the Yanshan fold and thrust belt, eastern North China Craton: Geochronological, geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic evidence for lithospheric thinning. *J. Petrol.*, 49(2): 315–351
- Yang WB, Shan Q, Zhao ZH, Luo Y, Yu XY, Li NB and Niu HC. 2011. Petrogenic and metallogenic action of the alkaline granitoids in Baerzhe area; A comparison between mineralized and barren plutons. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1689–1704 (in Chinese with English abstract)
- Zeng T, Wang T, Guo L, Tong Y, Zhang JJ, Shi XJ, Zhang L and Li YF. 2011. Ages, origin and geological implications of Late Mesozoic granitoids in Xinkailing Region, NE China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1881–1900 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Song B, Hu JM, Liu SW, Yang YH, Chen FK, Liu XM and Liu J. 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis and tectonic implications. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 121(1–2): 181–200
- Zhang XH, Zhang HF, Tang YJ, Wilde SA 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(3–4): 262–281
- Zhang YL, Ge WC, Liu XM and Zhang JH. 2008. Isotopic characteristics and its significance of the Xinlin Town pluton, Great Hinggan Mountains. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(2): 177–186 (in Chinese with English abstract)
- Zhou CY, Wu FY, Ge WC, Sun DY, Abdel AA, Zhang JH and Cheng RY. 2005. Age, geochemistry and petrogenesis of the cumulate gabbro in Tahe, northern Great Xing'an Range. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 763–775 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JB and Wilde SA. 2013. The crustal accretion history and tectonic evolution of the NE China segment of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Res.*, 23(4): 1365–1377
- Zhou Y, Ge WC and Wang HQ. 2011. Petrogenesis of Mesozoic granite in Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountains: Constraints from geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(5): 901–923 (in Chinese with English abstract)
- 葛文春, 隋振民, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义. *岩石学报*, 23(2): 423–440
- 李欢. 2012. 大兴安岭北段大索尔珠沟地区侏罗纪岩浆演化及找矿潜力评价. 硕士学位论文. 武汉: 中国地质大学
- 李红霞, 郭锋, 李超文, 赵亮. 2012. 延边小西南岔金铜矿区早白垩世英云闪长岩的岩石成因. *地球化学*, 41(6): 497–514
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 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. *岩石学报*, 23(3): 565–582
- 林强, 葛文春, 吴福元, 孙德有, 曹林. 2004. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学. *岩石学报*, 20(3): 403–412
- 刘建峰, 迟效国, 张兴洲, 马志红, 赵芝, 王铁夫, 胡兆初, 赵秀羽. 2009. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义. *地质学报*, 83(3): 365–376
- 齐成栋, 纪春华, 韩江, 聂立军. 2003. 吉林省敦化地区晚三叠世碱性-亚碱性侵入杂岩体的地质特征及构造背景分析. *吉林地质*, 22(3): 12–18
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩质岩石的 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因. *岩石学报*, 23(2): 461–480
- 隋振民, 徐学纯. 2010. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩类 Sr-Nd 同位素特征及其地质意义. *中国地质*, 37(1): 48–55
- 孙德有, 吴福元, 高山. 2004. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定. *地球学报*, 25(2): 213–218
- 孙德有, 吴福元, 高山, 路孝平. 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. *地学前缘*, 12(2): 263–275
- 唐克东, 王莹, 何国琦, 邵济安. 1995. 中国东北及邻区大陆边缘构造. *地质学报*, 69(1): 16–30
- 武广, 陈衍景, 赵振华, 赵太平, 李之彤, 张哲. 2009. 大兴安岭北端洛古河东花岗岩的地球化学、SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和岩石成因. *岩石学报*, 25(2): 233–247
- 徐备, 陈斌. 1997. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构与演化. *中国科学(D辑)*, 27(3): 227–232
- 阎国翰, 牟保全, 许保良, 何国琦, 谭林坤, 赵晖, 何中甫, 张任祜, 乔广生. 2000. 燕辽-阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义. *中国科学(D辑)*, 30(4): 383–387
- 杨武斌, 单强, 赵振华, 罗勇, 于学元, 李宁波, 牛贺才. 2011. 巴尔哲地区碱性花岗岩的成岩和成矿作用: 矿化和未矿化岩体的比较. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6): 1689–1704
- 曾涛, 王涛, 郭磊, 童英, 张建军, 史兴俊, 张磊, 李永飞. 2011. 东北新开岭地区晚中生代花岗岩类时代、成因及地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6): 1881–1900
- 张彦龙, 葛文春, 柳小明, 张吉衡. 2008. 大兴安岭新林镇岩体的同位素特征及其地质意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(2): 177–186
- 周长勇, 吴福元, 葛文春, 孙德有, Abdel AA, 张吉衡, 程瑞玉. 2005. 大兴安岭北部塔河堆晶辉长岩体的形成时代、地球化学特征及其成因. *岩石学报*, 21(3): 763–775
- 周漪, 葛文春, 王清海. 2011. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的成因——地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约. *岩石矿物学杂志*, 30(5): 901–923

附中文参考文献

- 程瑞玉, 吴福元, 葛文春, 孙德有, 柳小明, 杨进辉. 2006. 黑龙江省东部饶河杂岩的就位时代与东北东部中生代构造演化. *岩石学报*, 22(2): 353–376
- 葛文春, 李献华, 林强, 孙德有, 吴福元, 尹成孝. 2001. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义. *地质科学*, 36(2): 176–183
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2005a. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *岩石学报*, 21(3): 749–762