

辽宁金伯利岩变基性岩石捕虏体地球化学及锆石年代学: 示踪华北下地壳早期演化*

郑建平** 余淳梅 路凤香

(中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

李惠民

(国土资源部天津地质矿床研究所, 天津 300170)

摘要 辽宁复县古生代金伯利岩中的变基性岩石捕虏体主要为石榴石麻粒岩, 少量的辉石角闪岩、变辉长岩和辉石正长岩. 它们的 SiO_2 含量在 47.3%~49.9%间. 石榴石麻粒岩多为中、粗粒变晶结构并呈三联点接触, 具石榴石+斜长石+辉石+条纹长石±金云母的矿物组合. 辉石角闪岩的矿物组合为斜长石+辉石+角闪石±条纹长石, 具 744~821 和 0.76~0.88 GPa的平衡温度和压力条件. 石榴石麻粒岩来源于辉石角闪岩之下, 相当于>29 km下地壳深度, 石榴石麻粒岩的化学组成相当于钙碱性玄武岩, 具非常宽的Ni(133×10^{-6} ~ 840×10^{-6}), 和Nb/Y(0.12~1.85)、Nb/U(3.51~53.86)和Ta/U(0.38~2.48). 辉石角闪岩和辉石正长岩组成上相当于碱性玄武岩. 它们被认为是底侵基性岩浆(结晶分异和未结晶分异)物质与古老地壳组分混染并经变质作用的产物, 并部分受到金伯利岩浆的影响. 变辉长岩锆石协和的表面年龄(2610~2580 Ma)以及石榴石麻粒岩、辉石角闪岩锆石近协和的上交点年龄(2578~2538 Ma), 说明它们是目前所知华北地块深部地壳最古老的捕虏体样品. 这些年龄记录着华北东部统一陆块形成事件, 即新太古代(2.6~2.5 Ga)是华北地块重要的陆壳生长期. 石榴石麻粒岩下交点年龄(1853 Ma)记录着早元古代的一次重要构造-热事件. 该事件可能与华北东、西部地块的碰撞作用以及华北克拉通的最后拼合(1.8 Ga)有关.

关键词 基性岩石捕虏体 岩石地球化学 锆石 U-Pb 年龄 岩石成因 下地壳演化 华北地块

2003-07-15 收稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40072021, 40133020, 40273001)和教育部优秀青年教师资助计划资助

** E-mail: jzheng@cug.edu.cn

华北地块自 3.8 Ga^[11]初始陆核形成以来, 经历了岛弧增生^[2~4]、裂谷带^[5~7]等多重复杂地质作用过程^[8], 并于~1.8 Ga^[2,3,9]最终完成基底克拉通化作用. 辽宁复县古生代金伯利岩既有丰富的橄榄岩捕虏体又有变基性岩石捕虏体. 对橄榄岩捕虏体的研究表明, 华北地块中奥陶世存在着冷、厚的岩石圈根, 深部地幔主要由亏损的方辉橄榄岩和二辉橄榄岩组成, 并存在多发地幔作用事件^[10]. 然而, 橄榄岩捕虏体的强烈蚀变制约着对岩石圈根形成年代的深入研究. 古生代金伯利岩侵位时的华北地块下地壳是什么时候形成的? 性质如何? 与中生代、新生代火山岩中麻粒岩捕虏体^[11~15]相比, 古生代金伯利岩中无疑包含着更丰富更真实的古老岩石圈壳-幔相互作用的信息. 本文报道了辽宁复县(图 1)古生代金伯利岩中石榴石麻粒岩、辉石角闪岩、变辉长岩和辉石正长岩等变基性岩石捕虏体的岩石地球化学和锆石 U-Pb 颗粒年龄结果, 并对它们的成因及华北地块地壳的早期演化进行了讨论.

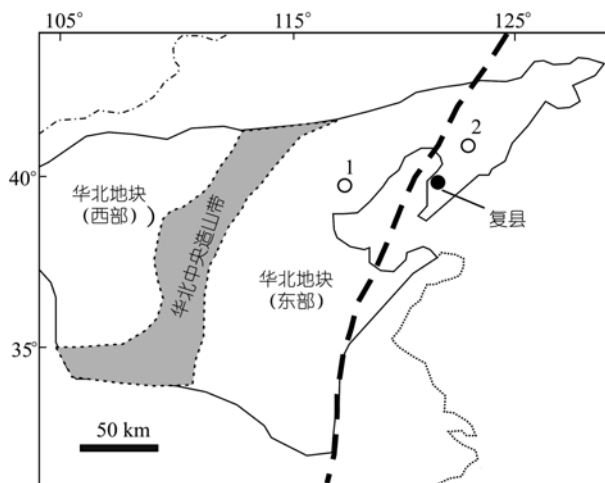


图 1 复县金伯利岩出露的构造位置

地块内部划分据文献^[2,3]; 3800 Ma 岩石出露点(1. 河北曹庄; 2. 辽宁鞍山)据文献^[1,16]

1 岩相学及矿物化学特征

复县变基性岩石捕虏体形态常呈球状. 它们在深源岩石捕虏体中所占的比例不足 5%. 这些捕虏体的直径多在 6~8 cm 间(仅个别达 12 cm), 包括: 1)石榴石麻粒岩(如 F25, LN9834, LN9841, LN9849,

F50-8638 和 F50-8633), 矿物组合是石榴石+辉石+斜长石±金云母; 2)辉石角闪岩(如 F41 和 LN9821), 组合为斜长石+辉石+角闪石±条纹长石; 和 3)变辉长岩(LN(F49))和辉石正长岩(LN9857). 其中石榴石麻粒岩最常见, 石榴石的含量高达 62%和 69%(表 1). 石榴石麻粒岩和辉石角闪岩的主要组成矿物均呈三连点接触. 前者粒度较粗, 为中、粗粒变晶结构; 后者粒度较细, 为中、细粒变晶结构. 金红石和钛铁矿分别是石榴石麻粒岩和辉石角闪岩的常见副矿物. 变辉长岩和辉石正长岩中长石和辉石的粒状集合体多呈板状形态, 显示残余岩浆结构特点. 除个别石榴石麻粒岩的暗色矿物与浅色矿物相间排列呈条带状定向构造外, 大部分捕虏体为块状构造.

石榴石属富镁铝榴石分子的铁铝榴石($\text{Alm}_{49-50}\text{Pyr}_{33-35}\text{Grs}_{10-16}\text{Spe}_1$, 表 2), 并普遍有沿(111)分布的金红石针状出溶物. 斜长石多发育简单双晶. 除 F41 的斜长石为中长石(An_{38})外, 其余样品为更长石(An_{20-29}). 碱性长石是 LN9857(辉石正长岩)的主要组成矿物. 该矿物在 LN9821(辉石角闪岩)中也有较高含量, 并少量出现在 LN(F49)(变辉长岩)和 F25(石榴石麻粒岩)中. 它们成分上为 $\text{Or}_{62-98}\text{Ab}_{2-37}$ 的正条纹长石. 角闪石(辉石角闪岩的重要组成矿物)为富钛的镁铁闪石, TiO_2 含量高达 2.52%. 金云母(Mg/Fe 比达 5.5)多呈填隙状产出, 且 TiO_2 含量高(达 5.33%). 磷灰石是复县变基性岩石捕虏体的常见副矿物, 常发育沿 C 轴方向生长的管状独居石包裹体(激光拉曼探针结果). 除辉石角闪岩中的透辉石还新鲜外, 其他岩石的辉石均已绿泥石化, 只能通过其形态、残留解理等假象来辨认.

2 岩石地球化学特征

复县变基性岩石捕虏体除 SiO_2 变化很窄(47.3%~49.9%)外, $\text{Mg}^\#$, Al_2O_3 , TiO_2 和 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 都变化很大(表 3). 石榴石麻粒岩的 Rittman 指数很低. 除 F50-8633 达 2.07 外, 均低于 1.0, 成分上相当于钙碱性玄武岩; 辉石角闪岩和辉石正长岩的 Rittman 指数分别高达 13.1 和 9.7, 成分上相当于碱性玄武岩. 在石榴石麻粒岩中, 除 F50-8633 和 F50-8638 有少量石英标准矿物分子外, 其他样品有橄榄石矿物分子.

表 1 复县变基性岩石捕虏体矿物组成含量(%)^{a)}

岩石类型	样品号	结构	构造	石榴石	斜长石	辉石	角闪石	碱性长石	钛铁矿	金红石	磷灰石	金云母	石英
石榴石麻粒岩	F25	粗粒变晶	块状	45.3	47.6			5.8	1.3				
石榴石麻粒岩	LN9834	粗粒变晶	块状	62.0	35.3	2.0				0.5		0.2	
石榴石麻粒岩	LN9841	粗粒变晶	块状	69.0	26.0	4.5				0.5			
石榴石麻粒岩	LN9849	中粒变晶	块状	22.5	28.5	46.4				0.9	0.5	1.2	
石榴石麻粒岩	F50-8633	中粒变晶	定向	23.5	36.2	40.3							
石榴石麻粒岩	F50-8638	中粒变晶	定向	24.0	35.2	40.8							
辉石角闪岩	F41	中粒变晶	块状		34.1	30.8	32.7		2.4				
辉石角闪岩	LN9821	细粒变晶	块状		18.4	8.1	32.5	21.9	3.1		2.3	3.7	
变辉长岩	LN(F49)	中粒变晶	块状		50.8	42.0		3.9	1.0		1.0		1.3
变辉石正长岩	LN9857	中粒变晶	块状		12.6	37.6		48.3			1.5		

a) 除 F41 和 LN9821 的辉石新鲜外, 其他岩石均已绿泥石化; LN(F49)和 LN9857 具残余岩浆结构

Al_2O_3 -“An”图解^[17]和 SiO_2 - K_2O 图解^[18]可以区分出中钾钙碱性系列(LN9849 和 F50-8638)、高钾钙碱性系列(LN9834 和 LN9841)和钾玄岩系列(F50-8633). 辉石角闪岩(LN9821)和辉石正长岩(LN9857)含橄榄石和霞石矿物分子, 相当于碱性玄武岩.

石榴石麻粒岩的 REE 变化于 $27 \times 10^{-6} \sim 143 \times 10^{-6}$ 间. 稀土元素配分曲线可分成 LREE/HREE 分馏不明显的平坦型($La_N/Yb_N=2.2 \sim 2.6$, 如 LN9834 和 LN9841)和 LREE/HREE 强烈分馏的 LREE 富集型($La_N/Yb_N=15.2 \sim 30.7$, 如 LN9849, F50-8633 和 F50-8638, 图 2). REE 配分曲线平坦的 LN9834 和 LN9841(具高的 HREE 含量)与它们有非常高含量的石榴石有关(见表 1). 辉石角闪岩 LN9821 具高达 489×10^{-6} 的稀土总量, 与其有高的磷灰石含量(2.3%, 见表 1)是一致的. 除 F50-8638 和 LN9857 的 Eu 正异常特征较明显($\delta Eu > 1.40$)外, 其他岩石捕虏体的 Eu 异常特征不很明显($\delta Eu = 0.80 \sim 1.0$).

石榴石麻粒岩 Ni 丰度变化很大, 为 $133 \times 10^{-6} \sim 840 \times 10^{-6}$. 与原始玄武岩^[19]相比, 除 LN9849, F50-8633 和 F50-8638 石榴石麻粒岩的 Ni 丰度较高外, 其他麻粒岩以及辉石角闪岩和辉石正长岩均较低. 除 LN9849 没有 Ti 异常外, 所有样品均高度亏损 Ta, 并不同程度地亏损 Ti, Zr, Hf 和 Nb (图 3). 石榴石麻粒岩的 Rb 丰度、K/Rb 和 Rb/Sr 比值分别为 $27.6 \times 10^{-6} \sim 44.6 \times 10^{-6}$, 184~623 和 0.08~0.26. 与石榴石麻粒岩相比, 辉石角闪岩和辉石正长岩具稍高的 Rb 丰度和 K/Rb 比值, 较低的 Rb/Sr 比值. 除 LN9849 有不明显的 Ba 负异常外, 所有捕虏体均富集 Ba. 除

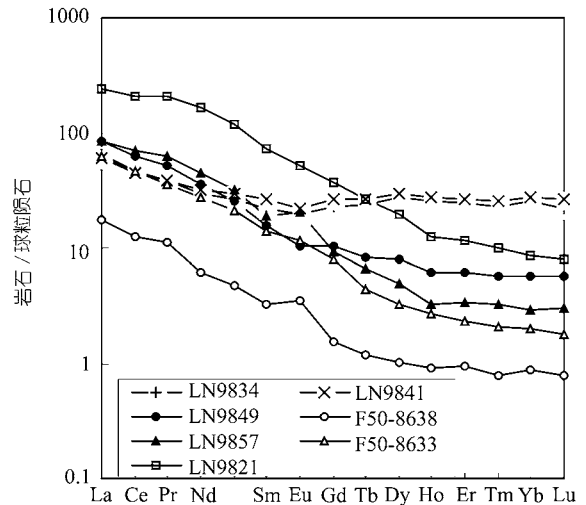


图 2 复县金伯利岩中变基性岩石捕虏体稀土元素配分曲线

LN9849 和 LN9857 外, 所有样品的 Sr 异常不明显. LN9849 和 LN9857 分别具明显负和正的 Sr 异常. 石榴石麻粒岩的 Ba 与 K_2O 具正相关, 但与 Na_2O 的相关性不明显, 说明 Ba 主要赋存于金云母中.

3 锆石特征及 U-Pb 同位素年龄

由于复县变基性岩石捕虏体的个体较小, 选择了较大的 1 块石榴石麻粒岩(F25)、1 块辉石角闪岩(F41)和 1 块变辉长岩(LN(F49)), 进行人工重砂挑选锆石. 对 3 个样品的 108 颗锆石进行了电子探针背散射(BSE)分析. 按照锆石的晶体形态和内部结构可以分成 3 种类型: 1) 完整晶体形态和完美结晶环带者(图 4(a)); 2) 过渡类型, 具溶蚀的晶体形态或具完美的

表 2 复县变基性岩石捕虏体代表性矿物电子探针分析(% , 质量百分比)

样品号	F25					LN9834		LN9841		LN9849		F41				LN9821					LN(F49)		LN9857	
岩石	麻粒岩					麻粒岩		麻粒岩		麻粒岩		辉石角闪岩				辉石角闪岩					变辉长岩		辉石正长岩	
矿物	Gr _t	Pl	Kfs	Phl ^{a)}	Pl ^{a)}	Gr _t	Pl	Gr _t	Pl	Gr _t	Pl	Phl	Cpx	Pl	Amp	Cpx	Kfs	Pl	Amp	Phl	Pl	Kfs	Pl	Kfs
分析数	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5
SiO ₂	38.5	61.3	62.9	37.8	61.3	38.4	60.4	39.0	62.4	38.9	63.4	39.6	49.4	58.2	40.4	51.2	64.0	61.3	42.5	38.3	61.7	60.9	62.3	65.5
TiO ₂	0.04	0.01	0.02	4.57	0.00	0.06	0.01	0.08	0.00	0.07	0.02	3.96	0.55	0.00	2.52	0.30	0.00	0.01	1.71	5.33	0.00	0.00	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	21.4	23.4	18.0	15.8	23.1	21.6	23.2	21.9	23.4	21.9	23.2	11.9	5.54	26.5	13.5	2.8	18.8	24.2	12.5	14.3	24.3	20.4	23.9	19.0
Cr ₂ O ₃	0.18	0.00	0.02	0.07	0.01	0.10	0.00	0.05	0.00	0.07	0.01	0.04	0.12	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	0.06	0.02
FeO	26.5	0.09	0.01	8.55	0.06	24.1	0.02	23.4	0.00	23.7	0.05	6.60	10.8	0.09	16.3	9.25	0.00	0.13	12.7	11.5	0.03	0.73	0.06	0.19
MnO	0.57	0.01	0.02	0.00	0.00	0.35	0.07	0.39	0.00	0.44	0.01	0.02	0.44	0.02	0.21	0.32	0.00	0.00	0.27	0.10	0.00	0.00	0.00	0.04
MgO	8.96	0.00	0.01	17.8	0.00	9.26	0.00	9.36	0.00	8.86	0.00	20.5	10.3	0.00	9.61	12.6	0.00	0.00	12.5	16.5	0.06	1.16	0.00	0.00
CaO	3.68	5.81	0.02	0.07	5.54	5.76	5.94	5.86	5.31	5.87	4.61	0.01	21.5	7.99	11.6	21.8	0.05	5.64	11.4	0.00	5.25	0.05	5.28	0.18
Na ₂ O	0.01	8.13	1.45	0.05	8.28	0.00	7.99	0.02	8.32	0.02	8.84	0.09	0.97	7.12	2.15	1.02	0.62	8.47	1.97	0.08	7.44	0.25	8.67	4.16
K ₂ O	0.00	0.17	13.8	9.58	0.29	0.00	0.39	0.02	0.30	0.01	0.62	10.1	0.03	0.20	1.22	0.02	15.1	0.38	2.05	9.49	0.68	16.5	0.15	10.4
NiO	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01	0.02	0.00	0.05	0.00	0.03	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.05	0.07	n.d.	n.d.	0.02	0.00
总量	99.9	98.9	96.2	94.4	98.6	99.7	98.0	100.2	99.7	99.8	100.8	92.8	99.7	100.1	97.5	99.3	98.5	100.2	97.7	95.6	99.4	100.0	100.4	99.5
Mg [#]	0.38		0.79			0.41		0.42		0.40		0.85	0.63		0.51	0.71			0.64		0.72			
An	28		27			29		26		22		38		27			28		25		1			
Ab	14												6			2			37					
Or	86												94			98			62					
X _{Mg}	33					34		35		33														
X _{Fe}	55					50		49		50														
X _{Ca}	10					15		16		16														
X _{Mn}	1					1		1		1														
Jd												8		8										
Ac												0		0										
Ts												5		19										
Di+Hd												87		74										

a) 石榴石中的矿物包裹体

表 3 复县变基性岩石捕虏体主量(%, 质量百分比)和微量元素(10^{-6})

样品号	LN9834	LN9841	LN9849	F50-8638	F50-8633	LN9821	LN9857
岩石	石榴石麻粒岩	石榴石麻粒岩	石榴石麻粒岩	石榴石麻粒岩	石榴石麻粒岩	辉石角闪岩	变辉石正长岩
SiO ₂	49.7	49.9	47.3	49.5	49.8	47.4	49.7
TiO ₂	1.26	1.37	1.08	0.42	0.39	1.57	0.72
Al ₂ O ₃	16.8	16.7	13.3	17.4	14.5	16.5	16.5
Fe ₂ O ₃	6.34	6.99	3.66	5.90	6.84	4.86	1.30
FeO	8.70	8.76	9.03	6.03	3.22	6.81	5.04
MnO	0.19	0.20	0.08	0.07	0.02	0.10	0.03
MgO	5.57	4.74	12.6	8.80	10.9	6.18	10.8
CaO	6.27	6.43	6.61	5.26	4.45	5.54	4.79
Na ₂ O	0.55	0.46	0.34	1.07	0.90	3.22	1.60
K ₂ O	1.82	1.96	0.99	1.22	2.85	4.37	6.46
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0.22	0.02	0.35	1.13	0.36
H ₂ O ⁺	2.71	2.45	4.83	3.71	5.01	2.29	2.61
CO ₂	0.05	0.03	0.09	0.05	0.22	0.02	0.10
总和	100.1	100.0	100.1	99.2	99.4	100.0	100.0
La	24.9	23.0	32.2	19.8	23.3	89.9	31.4
Ce	46.1	44.2	60.1	36.9	46	205	67.9
Pr	5.28	5.28	7.09	4.53	4.87	28.0	8.41
Nd	21.5	22.9	25.6	13.2	19.9	117	32.3
Sm	5.13	6.11	3.59	2.22	3.26	16.9	4.40
Eu	1.73	1.93	0.89	0.90	1.02	4.52	1.76
Gd	7.09	8.09	3.20	1.44	2.52	11.5	2.92
Tb	1.37	1.53	0.50	0.21	0.26	1.57	0.39
Dy	10.7	11.6	3.06	1.20	1.29	7.64	1.89
Ho	2.26	2.44	0.55	0.24	0.24	1.11	0.29
Er	6.17	6.68	1.55	0.72	0.59	2.94	0.87
Tm	0.89	0.97	0.22	0.09	0.08	0.39	0.12
Yb	6.28	6.83	1.40	0.66	0.50	2.15	0.73
Lu	0.85	1.01	0.22	0.09	0.07	0.31	0.12
Ni	133	165	402	571	840	85.6	146
Co	39.4	35.8	28.9	28.5	28.5	26.8	26.1
Cr	148	151	296	153	75.0	89.7	58.0
Cu	24.8	33.9	18.5	22.2	22.4	60.0	64.3
Cs	18.1	15.6	19.1	未分析	未分析	5.74	10.3
Rb	41.4	43.5	44.6	27.6	38.0	54.1	81.6
Sr	484	515	169	227	362	2006	1403
Ba	1429	1684	424	811	1449	4484	2285
Nb	13.6	9.55	17.4	9.90	10.6	19.9	8.24
Ta	0.63	0.52	0.25	0.54	0.46	0.54	0.39
Zr	102	97.2	52.5	65.7	61.0	21.1	18.5
Hf	2.50	2.38	1.87	1.50	1.76	0.96	0.78
Y	71.8	77.4	17.0	5.91	5.74	38.5	8.75
Pb	4.23	9.46	66.2	n.a	n.a	7.88	14.5
Th	1.47	1.40	9.32	5.50	4.90	0.44	0.35
U	0.25	0.26	0.47	0.94	1.20	0.14	0.22
Mg [#]	0.46	0.42	0.68	0.65	0.76	0.55	0.78
K ₂ O+Na ₂ O	2.37	2.42	1.33	2.29	3.75	7.59	8.06
K ₂ O/Na ₂ O	3.31	4.26	2.91	1.14	3.17	1.36	4.04
Rittman 指数	0.84	0.85	0.41	0.81	2.07	13.1	9.70
REE	140	143	140	27.0	104	489	153
Eu/Eu*	0.87	0.84	0.79	1.44	1.05	0.93	1.41
(La/Yb) _n	2.61	2.22	15.2	19.6	30.7	27.6	28.1
La/Nb	1.83	2.41	1.85	1.99	2.20	4.51	3.81
Nb/Y	0.19	0.12	1.02	1.68	1.85	0.52	0.94
Nb/U	53.9	36.8	36.9	3.51	8.83	142	37.5
Ta/U	2.48	2.02	0.53	0.57	0.38	3.85	1.79
Ce/Pb	10.9	4.68	0.91			26.0	4.69

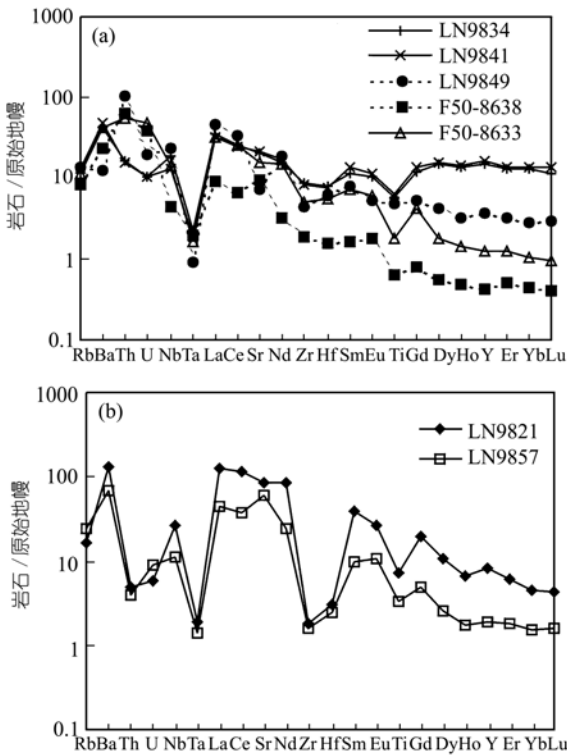


图 3 复县金伯利岩中变基性岩石捕虏体微量元素蛛网图 (a) 石榴石麻粒岩, (b) 辉石角闪岩和辉石正长岩

结晶核与均一宽的边(图 4(b), (c)); 3)圆形或内部均一者(图 4(d)). 石榴石麻粒岩(F25)中第 1 类型锆石所占的比率很低, 且具低的长/宽比. 相反, 变辉长岩(LN(F49))中第 1 类型锆石所占的比率很高, 且具高的长/宽比(表 4).

在进行单颗粒锆石 U-Pb 同位素年代学分析时尽量挑选无包裹体、结构单一者. 石榴石麻粒岩 F25 中 3 颗紫红色透明锆石(2 颗短圆柱状、1 颗浑圆状)偏离协和线, 给出 2578 ± 64 Ma 的上交点年龄和 1853 ± 169 Ma 的下交点年龄(图 5 和表 5). 辉石角闪岩 F41 中黄棕色透明锆石(1 颗不规则状、2 颗浑圆状)的上交点年龄为 2538 ± 30 Ma, 下交点年龄值为 1612 ± 249

Ma, 其中 1 和 2 号锆石重叠并落在协和线上, 给出 2534 ± 7 Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄(平均值). 变辉长岩 LN(F49)中 3 颗锆石均落在协和线上, 其中 2 颗紫红色透明长柱双锥状锆石重叠, 给出 2610 ± 3 Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄(平均值); 1 颗紫红色透明短柱状锆石给出 2580 ± 5 Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄.

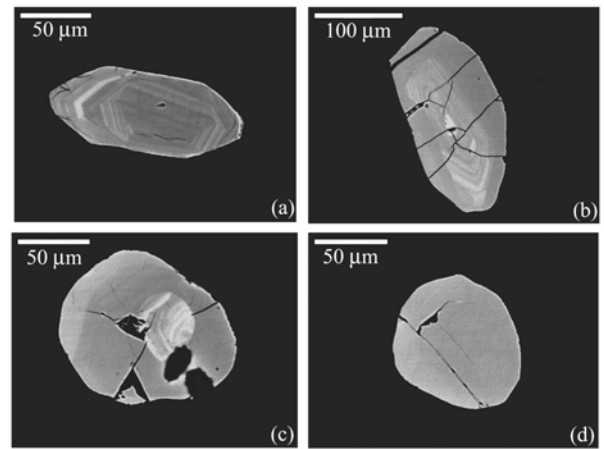


图 4 复县变基性岩石捕虏体锆石背散射(BSE)特征

(a) 锆石取自 LN(F49), (b) 锆石取自 F41, (c) 锆石取自 F25, (d) 锆石取自 F25

4 讨论

4.1 计算的温度/压力条件

对于有新鲜辉石的角闪岩(F41 和 LN9821), 利用 Hollister 等^[20]的角闪石 Al 压力计及 Blundy^[21]的角闪石-斜长石温度计, 获得平衡温度和压力值分别为 744~821 和 0.76~0.88 GPa. 由于石榴石麻粒岩中的辉石都已蚀变, 无法获得准确的平衡温度、压力条件. 本文采用新鲜矿物成分对比的方法来大致限定. 与地质体麻粒岩中斜长石和石榴石的成分^[22]相比, 复县石榴石麻粒岩中斜长石的 An 分子普遍偏低、石榴石的 Gro 分子普遍偏高, 并与高压麻粒岩中者^[2,3,11]

表 4 复县变基性岩石捕虏体锆石形态及内部结构特征对比

样品号	岩石类型	颗粒数	a)/%	b)/%	c)/%	平均颗粒大小/μm	平均长/宽比
F25	石榴石麻粒岩	47	2	19	79	60 (50~80)	1.3 (1.0~1.7)
F41	辉石角闪岩	34	6	50	44	100 (60~120)	1.5 (1.0~2.6)
LN(F49)	变辉长岩	27	100	0	0	50 (30~90)	2.3 (1.7~3.2)

a) 完整晶体形态和完美结晶环带锆石, b) 过渡类型, 具溶蚀的晶体形态或具完美的结晶核与均一宽边的锆石, c) 圆形或内部均一的锆石

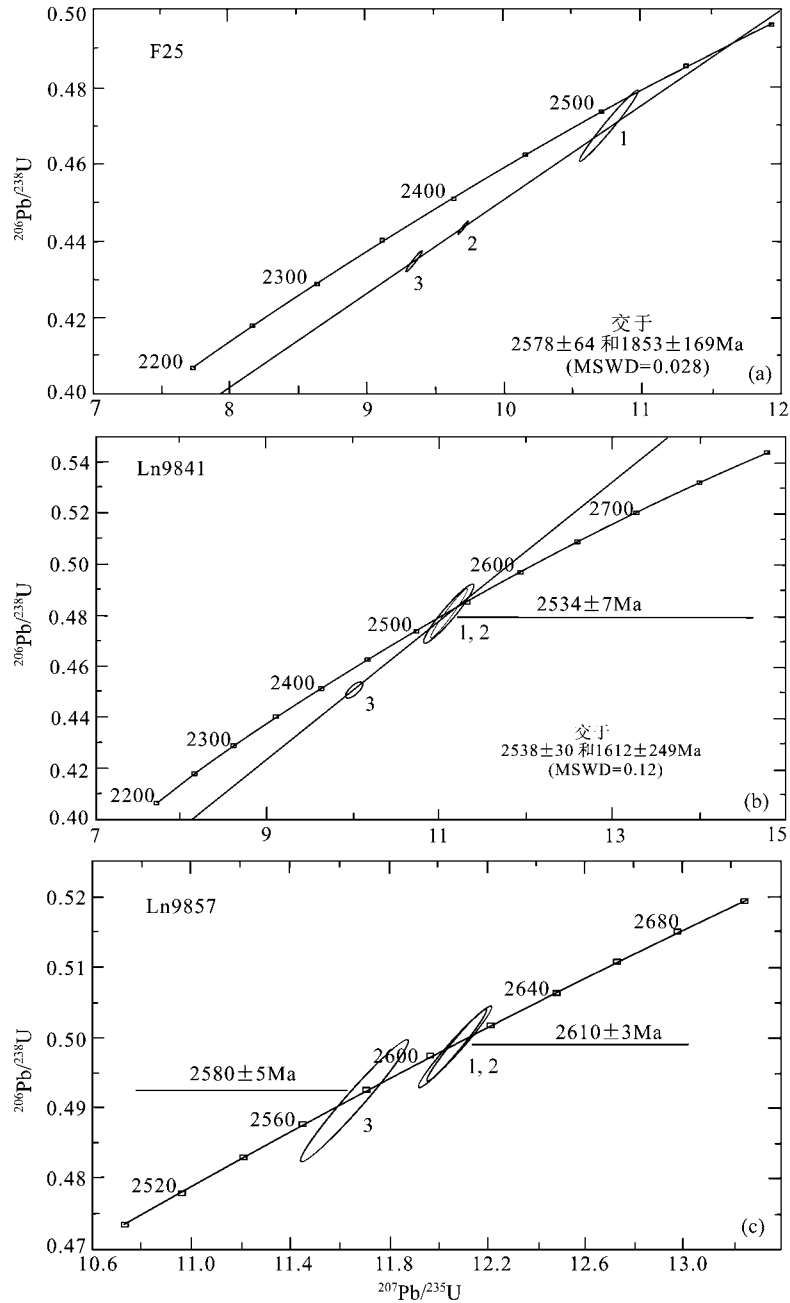


图 5 复县变基性岩石捕虏体锆石年龄协和图解

(a) 锆石取自 F25, (b) 锆石取自 F41, (c) 锆石取自 LN(F49)

相似。通过与辉石角闪岩的矿物组合对比, 认为石榴石麻粒岩的来源深度要比辉石角闪岩大, 相当于下地壳的深度(>29 km)。值得注意的是, 不管是石榴石麻粒岩还是辉石角闪岩, 均没有明显的减压抬升的岩相学结构迹象, 说明它们(特别是石榴石麻粒岩)在

古生代金伯利岩侵位时可能还在下地壳的位置。变辉长岩和辉石正长岩的残留岩浆结构则反映着弱的变质作用改造和较浅的来源深度。变辉长岩中锆石的完整形态、完美内部环带结构(见表 4)以及高且协和的锆石年龄(见表 5 和图 5)均可能说明后期来自深

表 5 复县变基性岩石捕虏体锆石 U-Pb 年龄结果

样品	锆石特征	重量/ μg	U(10^{-6})	Pb(10^{-6})	普通铅/ng	同位素原子比率				表面年龄(Ma)		
						$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
F25												
1	a, t, s, ep	10(2)	137	75	0.008	4379	0.4696 (75)	10.76 (18)	0.1662 (5)	2482	2503	2519
2	a, t, r	15(3)	336	170	0.021	5854	0.4434 (16)	9.701 (36)	0.1587 (1)	2366	2407	2442
3	a, t, s, ep	20(3)	283	138	0.018	7339	0.4346 (22)	9.339 (50)	0.1559 (2)	2326	2372	2411
F41												
1	y, t, ir, p	5(1)	98	56	0.006	2132	0.4805 (94)	11.12 (23)	0.1679 (7)	2529	2534	2537
2	y, t, r	10(2)	87	50	0.009	2678	0.4803 (93)	11.08 (22)	0.1673 (7)	2529	2530	2531
3	y, t, r	15(2)	245	165	0.460	212	0.4507 (23)	10.01 (7)	0.1611 (7)	2399	2436	2467
LN(F49)												
1	a, t, l, dp	10(3)	107	63	0.010	2957	0.4990 (45)	12.08 (11)	0.1755 (4)	2610	2610	2611
2	a, t, l, dp	5(1)	205	116	0.008	3500	0.4987 (47)	12.06 (12)	0.1754 (4)	2608	2609	2609
3	a, t, s, p	15(3)	42	24	0.011	1511	0.4910 (72)	11.66 (18)	0.1723 (5)	2575	2578	2580

a, 紫红色; y, 黄棕色; t, 透明; s, 短; l, 长; p, 柱状; ep, 熔蚀状; ir, 不规则状; dp, 双锥状。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 已对实验空白(Pb=0.050ng, U=0.002ng)及稀释剂作了校正。其他比率中的铅同位素均为放射性成因铅同位素。同位素括号内的数字为 2σ 绝对误差, 例如: 0.4346 (22)表示 $0.4346\pm 0.0022(2\sigma)$ 。样品重量括号内数据为分析的锆石颗粒数目

部的热事件对其影响较弱。

4.2 变基性岩石捕虏体的成因

大陆地壳生长主要发生于板块边界的侧向增生和板块内部的垂向增生^[23-25]。对于下地壳捕虏体的起源已有多种解释, 如熔融残余、堆晶、变质分异^[24]和变沉积岩^[26,27]等。地幔来源的岩浆底侵在下地壳的底部被认为是重要的地壳增生机制^[28,29]。底侵岩浆的成分通常是玄武质的^[30,31]或相关的堆积物^[32]。复县变基性岩石捕虏体都有完美结晶核的锆石残留, 被认为是未被彻底改造的岩浆结晶作用产物。除 LN9849(石榴石麻粒岩)和 LN9857(辉石正长岩)外, 这些捕虏体具较明显的 MgO 与 Ni 的正相关(图 6), 说明橄榄石曾是主要的结晶相。正和负的 Eu 异常(图 2, 表 3)显示, 在它们的成因中曾有过斜长石的堆积和分异作用。除 CaO 与 MgO(不包括 LN9849)为负相关外, 其他氧化物如 K_2O (图 6), Al_2O_3 及 Na_2O 均呈散点分布, 反映地壳组分的混染作用。非常宽的微量元素丰度及非常宽的 La/Nb, Nb/Y, Nb/U, Ta/U 和 Ce/Pb 比值变化(见表 3)也支持混染的认识。与 Rudnick^[33]所报道的下地壳麻粒岩捕虏体资料相比, 复县的石榴石麻粒岩具较高的 K_2O 含量(平均 1.77%)。这种高 K_2O 特征可能与填隙状金云母有关, 被解释为金伯利岩浆影响的结果。因此, 我们认为复县变基性岩石捕虏体是

基性岩浆(包括结晶分异和未结晶分异)物质受古老地壳组分的混染、变质改造的结果, 并不同程度地受到了寄主岩(金伯利岩)浆的影响。在华北地块内部, 河北曹庄和辽宁鞍山杂岩中所发现的 3800 Ma 露头岩石^[1,16]都离复县不超过 500 km(图 1)。结合 2.5~2.6 Ga 的锆石上交点年龄和岩石所遭受的地壳混染作用, 我们把这些捕虏体的初始物质形成与岩浆底侵作用进行了联系。

4.3 晚太古代地壳增生

华北地块在初始陆核形成之后, 经历了新太古代^[22, 34]和古元古代^[2,7]等一系列构造岩浆事件。直至新太古代, 华北地块还没有形成统一的大陆^[5,35], 而是由一些微大陆^[9]组成。在华北中央造山带^[36], 阜平杂岩和五台杂岩中大量 2700~2500 Ma 的岩浆作用^[5,37-39]被认为与岛弧系有关^[40]。在五台-阜平岛弧系东部, 相当于华北东部地块^[2,31], 所报道的古老年龄岩石还包括: 河北东部 3.5 Ga 和 2.7 Ga 的角闪岩^[41], 山东西部 2.7 Ga 的 TTG 片麻岩和角闪岩^[42]。在岛弧系的西部, 相当于华北西部地块^[2,31], 所报道的古老年龄信息包括 2.7~2.6 Ga TTG 片麻岩, 夹少量基性岩和沉积岩^[6,9,35]。不管是东部的、还是西部地块的太古代岩石, 它们都被 2.5 Ga 同构造花岗岩侵入并经历了绿片岩相至麻粒岩相变质作用改造^[9,40]。本文

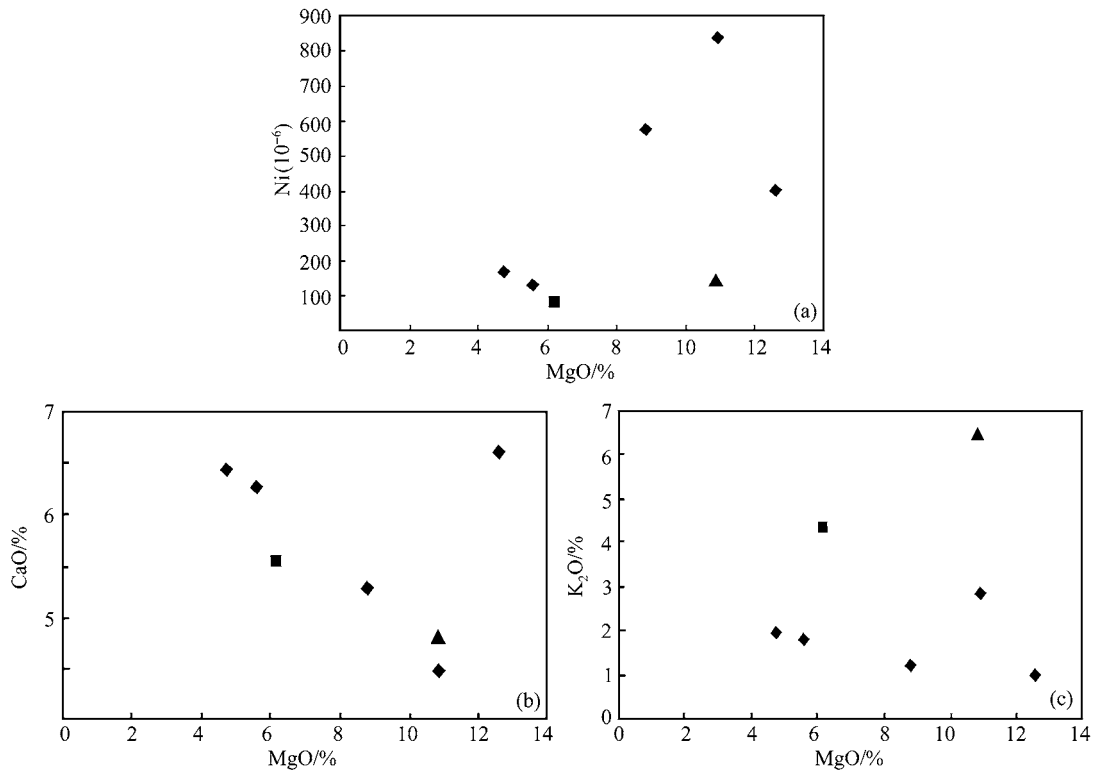


图 6 复县变基性岩石捕虏体 MgO 与选择的元素和氧化物投点
 , 石榴石麻粒岩; , 辉石角闪岩; , 变辉石正长岩

所报道的岩石是华北地块下地壳已知的最古老的捕虏体样品。变辉长岩的协和年龄(2610~2580 Ma)以及辉石角闪岩和石榴石麻粒岩近协和的上交点年龄(分别为 2538 和 2578 Ma), 可能记录着华北东部统一陆块的形成事件, 即新太古代(2.6~2.5 Ga)是华北地块重要的陆壳生长时期。

4.4 元古代下地壳的再改造

早元古代(~1.8 Ga)的构造-热事件, 在五台-阜平岛弧系及其相邻的构造单元中已被大量锆石重结晶边缘的SHRIMP定年^[40], 和各种变质岩的角闪石和黑云母的⁴⁰Ar-³⁹Ar和 K-Ar定年^[9,43]所证实。该事件的进一步证据还包括广泛出露的S-型花岗岩和紧密相关的基性岩石^[40]以及华北中央造山带的高压基性麻粒岩^[36]。这些高压基性麻粒岩被认为是~1.8 Ga华北东部与西部地块的碰撞作用产物, 该碰撞作用导致了华北克拉通的最后拼合^[36]。石榴石麻粒岩锆石下交点年龄为 1853 Ma, 可能是这次重要构造-热事件

并导致区域变质作用发生的深部岩石记录; 而辉石角闪岩锆石下交点(1612 Ma)明显比通常认为的碰撞年龄^[36]年轻, 可能存在后续热事件的扰动。

5 主要认识

辽宁复县古生代金伯利岩中变基性岩石捕虏体包括主要的石榴石麻粒岩和少量的辉石角闪岩、变辉长岩和辉石正长岩。这些具基性岩浆成分(47.3%~49.9% SiO₂)的捕虏体代表着古生代岩石圈剖面不同深度的样品, 其中石榴石麻粒岩来自下地壳深度(> 29 km)。石榴石麻粒岩化学成分上相当于钙碱性玄武岩, 具明显Ni丰度及非常宽的Nb/Y, Nb/U和Ta/U变化。辉石角闪岩和辉石正长岩成分上相当于碱性玄武岩。这些变基性岩石捕虏体被认为是底侵基性岩浆(结晶分异和未结晶分异)物质与古老地壳组分的混染并经变质作用的产物, 并不同程度地受到金伯利岩浆的影响。变辉长岩锆石 2610~2580 Ma的协和年龄、以及石榴石麻粒岩和辉石角闪岩锆石

2578~2538 Ma的近协和上交点年龄, 显示它们是所报道的华北地块深部地壳最古老的捕虏体样品. 这些年龄结果同时说明, 新太古代(2.6~2.5 Ga)是华北地块重要的陆壳生长时期, 记录着华北东部统一陆块的形成. 石榴石麻粒岩锆石 1853 Ma的下交点年龄, 记录着早元古代的一次重要构造-热事件. 该事件可能与导致华北克拉通最后拼合(~1.8 Ga)的华北东、西部地块的碰撞作用有关.

致谢 矿物电子探针在澳大利亚 Macquarie 大学完成; 全岩主元素湿化学分析和微量元素 ICPMS 分析在中国地质大学完成; 颗粒锆石 U-Pb 年龄分析在国土资源部天津地质矿床研究所完成.

参 考 文 献

- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 1992, 20: 339~342 [\[DOI\]](#)
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Thermal evolution of two textural types of mafic granulites in the North China craton: evidence for both mantle plume and collisional tectonics. *Geol Mag*, 1999, 136(3): 223~240 [\[DOI\]](#)
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 2001, 107: 45~73 [\[DOI\]](#)
- 钱祥麟, 李江海. 华北北部麻粒岩相带不整合面的确定及其早期构造演化意义. *中国科学, D 辑*, 1999, 29(1): 1~8
- 翟明国, 卞爱国. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(增刊): 129~137
- 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 等. 中国前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 1992. 198
- 李江海, 钱祥麟, 黄雄南, 等. 华北陆块构造格局及早期大陆克拉通演化过程. *岩石学报*, 2000, 16(1): 1~10
- 郭敬辉, 翟明国, 李江海. 华北克拉通早前寒武纪桑干构造带的岩石组合特征及构造演化. *岩石学报*, 1996, 12(2): 193~206
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1998. 177
- 郑建平, 路凤香. 胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体岩石学特征: 古生代岩石圈地幔及其不均一性. *岩石学报*, 1999, 15: 65~76
- Zheng J P, Sun N, Lu F X, et al. Mesozoic lower crustal xenoliths and their significance in lithospheric evolution beneath the Sino-Korean Craton. *Tectonophysics*, 2003, 361: 37~60 [\[DOI\]](#)
- 邵济安, 韩庆军, 李惠民, 等. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(增刊): 148~153
- 周新民, 于津海, 徐夕生, 等. 女山玄武岩中的麻粒岩捕虏体的发现和意义. *科学通报*, 1992, 13: 1198~1201
- 樊祺诚, 刘若新. 汉诺坝玄武岩中的高温麻粒岩捕虏体. *科学通报*, 1996, 41(3): 235~238
- Chen S H, O'Reilly S Y, Zhou X H, et al. Thermal and petrological structure of the lithosphere beneath Hannuoba, Sino-Korean craton, China: evidence from xenoliths. *Lithos*, 2001, 56: 267~301 [\[DOI\]](#)
- Song B, Nutman A P, Liu D Y, et al. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precambrian Res*, 1996, 78: 79~94 [\[DOI\]](#)
- Irvine I N. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can J Earth Sci*, 1971, 8: 532~548
- Le Maitre R W. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. London: Blackwell Scientific Publ, 1982. 20~21
- Langmuir C H, Bender J F, Bence A E, et al. Petrogenesis of basaltic rocks from the FAMOUS area: mid-Atlantic ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 1977, 36: 133~156
- Hollister L S, Grissom G C, Peter E K, et al. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *Am Mineral*, 1987, 72: 231~239
- Blundy J D, Holland T J B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib Mineral Petrol*, 1990, 104: 208~224
- 贺高品, 叶慧文. 冀东麻粒岩相区的变质作用及其演化. *岩石学报*, 1992, 8(2): 128~135
- Griffin W L, O'Reilly S Y. The lower crust in eastern Australia: xenolith evidence. In: Dawson J B, Carswell D A, Hall J W, eds. *Nature of the Lower Crust*. Geol Soc London, Spec Publ, 1986, 24: 363~374
- Rudnick R L. Making continental crust. *Nature*, 1995, 378: 571~578 [\[DOI\]](#)
- Condie K C. Mafic crustal xenoliths and the origin of the lower continental crust. *Lithos*, 1999, 46: 95~101 [\[DOI\]](#)
- Stosch H G, Schmucker A, Reys Ch. The nature and geological history of the deep crust under the Eifel, Germany. *Terra Nova*, 1989, 4: 53~62
- Liu Y S, Gao S, Jin S Y, et al. Geochemistry of lower crustal xenoliths from Neogene Hannuoba Basalt, North China Craton: Implications for petrogenesis and lower crustal composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(15): 2589~2604 [\[DOI\]](#)
- O'Reilly S Y, Griffin W L. Moho and petrologic crust-mantle boundary coincide under southeastern Australia. *Geology*, 1994, 22: 666~667 [\[DOI\]](#)
- Condie K C. Episodic continental growth models: afterthoughts and extensions. *Tectonophysics*, 2000, 322: 153~162 [\[DOI\]](#)
- Bradley S D, McCallum M E. Granulite facies and related xenoliths from Colorado-Wyoming kimberlite. In: Kornprobst J, ed. *Kimberlites II: The Mantle and Crust-Mantle Relationships: Developments in Petrology*. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: Elsevier, 1984. 11B: 205~218
- Aspen P, Upton B G J, Dickin A P. Anorthoclase, sanidine and as-

- sociated megacrysts in Scottish alkali basalts: high-pressure syenitic debris from upper mantle sources. *European Journal of Mineralogy*, 1990, 2: 503~517
- 32 Arculus R J, Ruff L J. Genesis of continental crust: evidence from island arcs, granulites, and exospheric processes. In: Vielzeuf D, Vidal P, eds. *Granulites and Crustal Evolution*. NATO ASI Series C, 1990, 311: 7~23
- 33 Rudnick R L. Xenoliths: Samples of the lower continental crust. In: Fountain D M, Arculus R, Kay R W, eds. *Continental Lower Crust*. Development in Geotectonics. Amsterdam-London-New York-Tokyo: Elsevier, 1992, 23: 269~316
- 34 Jahn B M, Ernst W G. Late Archean Sm-Nd isochron age for mafic-ultramafic supracrustal amphibolites from the northeastern Sino-Korean Craton, China. *Precambrian Res*, 1990, 46: 295~306 [\[DOI\]](#)
- 35 程裕淇, 主编. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 1998. 167
- 36 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 2000, 103: 55~88 [\[DOI\]](#)
- 37 Sun M, Armstrong R L, Lambert R St J. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd isotopic geochemistry of early Precambrian rocks, Wutaishan and Taihangshan areas, China. *Precambrian Res*, 1992, 56: 1~31 [\[DOI\]](#)
- 38 Wilde S A, Cawood P, Wang K Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of granites and gneisses in the Taihangshan-Wutaishan area: Implication for the timing of crustal growth in the North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(1): 1~14
- 39 Liu S W, Pan Y M, Li J H, et al. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton. *Precambrian Research*, 2002, 117: 41~56 [\[DOI\]](#)
- 40 Guan H, Sun M, Wilde S A, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Fuping Complex: implications for formation and assembly of the North China Craton. *Precambrian Research*, 2002, 113: 1~18 [\[DOI\]](#)
- 41 Jahn B M. Origin of granulites: geochemical constraints from Archean granulite facies rocks of the Sino-Korean craton, China. In: Vielzeuf D, Vidal P, eds. *Granulites and Crustal Evolution*. NATO ASI Series, Series C, 1990, 311: 471~492
- 42 Jahn B M, Auvray B, Cornichet J, et al. 3.5 Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China; field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry. *Precambrian Res*, 1987, 34: 311~346 [\[DOI\]](#)
- 43 Wang K Y, Hao J, Zhou S P, et al. SHRIMP geochronology on single zircon grains: constraints on timing of the Wutai orogenic events. *Contrib Mineral Petrol*, 1997, 88: 322~327