

辽东前任屯角闪岩形成的时代

——锆石 SHRIMP U₂₃₈Pb 定年证据

许文良, 杨德彬, 裴福萍, 纪伟强

(吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 辽东前任屯角闪岩中锆石的阴极发光图像显示其具均匀的吸收条带, 具有镁铁质-超镁铁质岩中锆石的特征。锆石的 SHRIMP U₂₃₈Pb 分析结果主要集中在谐和线上 117~ 143 Ma 之间, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 的平均年龄值为 128.6 ± 5.1 Ma (²⁰⁴Pb 校正的结果), 表明前任屯角闪岩岩体的形成时间为早白垩世。研究区内早白垩世镁铁质-超镁铁质岩石和花岗质岩石的共存, 即双峰式岩浆作用的存在, 表明华北克拉通东部早白垩世时期强烈伸展环境的存在, 同时暗示中生代岩石圈地幔减薄达到了峰期。

关键词: 角闪岩; 锆石; SHRIMP U₂₃₈Pb 定年; 前任屯; 辽东

中图分类号: P588.1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)04-0273-06

Chronology of Qianrentun amphibolite in eastern Liaoning: Evidence from SHRIMP zircon U₂₃₈Pb dating

XU Wen-liang, YANG De-bin, PEI Fu-ping and JI Wei-qiang

(College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: The zircons from Qianrentun amphibolite in eastern Liaoning show an uniform absorbing band in cathodoluminescence (CL) images, being of characteristics of zircons in the mafic-ultramafic intrusives. SHRIMP U₂₃₈Pb dating results of the zircons are mainly distributed between the concordia ages of 117~ 143 Ma with a weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 128.6 ± 5.1 Ma (²⁰⁴Pb corrected), indicating that the amphibolite was formed in Early Cretaceous. The coexistence of Early Cretaceous mafic-ultramafic igneous rocks and granitoids in eastern Liaoning, i. e. the presence of the bimodal magmatism, suggests that a strong extensional environment existed in the eastern part of the North China Craton in Early Cretaceous and that the thinning of lithospheric mantle reached its culmination in that period.

Key words: amphibolite; zircon; SHRIMP U₂₃₈Pb dating; Qianrentun; eastern Liaoning Province

华北克拉通是研究显生宙大陆岩石圈深部作用过程的一个天然实验室(Griffin *et al.*, 1998)。近年来, 对华北克拉通东部显生宙岩浆作用和深源包体的研究已经揭示岩石圈减薄过程的存在(Fan *et al.*, 1992, 2000; Menzies *et al.*, 1993, 1998; Griffin *et al.*, 1998; 郑建平, 1999; Xu X *et al.*, 2000; Xu

Y, 2001)。但是, 目前对华北克拉通东部显生宙岩石圈减薄过程与机制仍存在不同的认识, 对此提出了不同的成因模式(邓晋福等, 1996; Gao *et al.*, 1998, 2002; 吴福元等, 1999, 2003; 路凤香等, 2000; 许文良等, 2000; Xu Y, 2001; Zhang *et al.*, 2002)。上述问题之所以存在, 主要是因为对华北克拉通中

收稿日期: 2004-08-25; 修订日期: 2005-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40133020, 40472033)

作者简介: 许文良(1959-), 男, 教授, 岩石学专业, 电话: 0431-8502080, E-mail: xuwl261@sina.com。

生代岩浆活动的时代缺乏精确的定年数据。本文报道了华北克拉通东南边缘辽东前任屯角闪岩中锆石 SHRIMP U_Pb 的定年结果,这对解决上述问题可以提供有益的启示。

1 地质概况

辽东地区位于华北克拉通的东南边缘,区内出露的主要地层为太古宙的高级变质岩。该区中生代岩浆作用强烈,主要表现为基性岩浆作用和花岗质岩浆作用两类。

前任屯岩体位于辽东皮口镇北约 3 km 处,出露面积约 0.15 km²(图 1)。岩体侵入印支期第二次侵入的徐洼子花岗岩中(辽宁省地质矿产局,1989)。1:20 万区域地质调查报告(1973)将徐洼子花岗岩确定为早、中侏罗世侵入体,前任屯岩体为晚侏罗世侵入体^①,而辽宁省区域地质志则将前任屯岩体的形成时代确定为燕山早期(侏罗纪)(辽宁省地质矿产局,1989)。

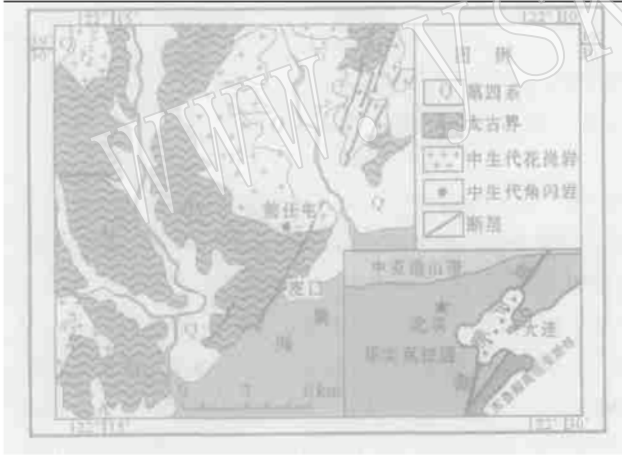


图 1 辽东前任屯岩体产出的构造位置图
(据辽宁省地质矿产局,1989)

Fig. 1 Geological sketch map of Qianrentun intrusive in eastern Liaoning Province (after Liaoning Bureau of Geology and Mineral Resources, 1989)

前任屯岩体出露形态为椭圆形,岩体具有分异现象,自内向外基性程度增高,内部相为角闪石化二辉石岩,边缘相为角闪岩。岩体中有花岗岩脉、伟晶岩脉和石英脉穿切。

徐洼子岩体位于前任屯岩体的外侧,主要由变

形较强的中细粒黑云母二长花岗岩组成。目前尚未对其进行年龄测定,但该岩体与其西部洼子店岩体具有相同的岩石组合特征——片麻状黑云母二长花岗岩,后者锆石 U_Pb 年龄为 120 ± 4 Ma (Wu et al., 2005)。该区多数片麻状花岗岩具有该年龄值 (Wu et al., 2005)。结合徐洼子岩体的细粒黑云母二长花岗岩脉穿切前任屯角闪岩地质现象(图 2),说明徐洼子黑云母二长花岗岩的形成应晚于前任屯角闪岩。



图 2 二长花岗岩岩脉穿切前任屯角闪岩

Fig. 2 Qianrentun amphibolite penetrated by monzonitic granite veins

Gr—花岗岩脉; Amph—角闪岩

Gr—granite vein; Amph—amphibolite

2 样品描述和分析方法

前任屯角闪岩呈半自形粒状结构,角闪石具浅黄绿色-淡绿色多色性,含量在 96% 左右;斜长石呈他形或半自形充填在角闪石粒间,含量在 6% 左右,并发育有绿帘石化,在角闪石中可见到少量单斜辉石的残留,单斜辉石具有角闪石化和次闪石化。岩石中的副矿物为磷灰石、磁铁矿、榍石和锆石。

锆石用常规的浮选和电磁选方法进行分选,然后将其与标准锆石(Temora, 417 Ma)一起粘贴在环氧树脂表面,抛光后将待测锆石进行透射光、反射光、阴极发光和背散射扫描电镜显微照相。锆石 U_Pb 同位素分析在中国地质科学院地质研究所的 SHRIMP_II 离子探针上用标准测定程序进行。有关实验条件、流程及样品靶制备参见 Williams 等

① 辽宁省地质局. 1973. 1:20 万区域地质调查报告(庄河幅).

(1998) 和宋彪等(2002), 选择阴极发光图像分析显示吸收程度均匀的区域进行分析, 束斑为 20~ 30 μm。数据采集在 5 个扫描仪上进行。普通铅的校

正用测定的²⁰⁴Pb 进行, 所给定的同位素比值和年龄的误差为 1σ, 分析结果列于表 1。

表 1 前任屯角闪岩中锆石 SHRIMP U₂₃₈Pb 定年数据
Table 1 SHRIMP zircon U₂₃₈Pb dating data of Qianrentun amphibolite

样号	U μg·g ⁻¹	Th μg·g ⁻¹	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* / μg·g ⁻¹	年龄/ Ma			同位素比值							
					²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (1)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (2)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (3)	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb*	误差 ±%	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	误差 ±%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	误差 ±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	误差 ±%
DD17_1_1	363	589	1.68	7.76	141 ± 13	137 ± 12	143 ± 20	45.4	9.4	0.068	35	0.206	36	0.0221	9.3
DD17_1_2	450	746	1.71	8.86	137 ± 13	134 ± 12	133 ± 19	46.7	9.4	0.065	22	0.193	24	0.0214	9.4
DD17_1_3	210	246	1.21	3.75	121 ± 12	124 ± 11	124 ± 15	52.9	9.7	0.029	100	0.075	100	0.0189	9.7
DD17_1_4	364	491	1.39	7.43	135 ± 12	136 ± 12	135 ± 18	47.5	9.3	0.037	60	0.107	61	0.0211	9.3
DD17_1_5	740	1320	1.84	14.0	135 ± 12	135 ± 12	135 ± 18	47.2	8.9	0.048	16	0.142	18	0.0212	8.9
DD17_1_6	426	732	1.77	8.33	138 ± 12	133 ± 12	131 ± 19	46.1	9.1	0.080	15	0.240	18	0.0217	9.1
DD17_1_7	335	497	1.53	5.97	126 ± 11	120 ± 11	120 ± 16	50.8	9.1	0.081	16	0.221	18	0.0197	9.1
DD17_1_8	481	744	1.60	9.32	138 ± 12	133 ± 12	133 ± 18	46.4	9.1	0.075	16	0.223	18	0.0216	9.1
DD17_1_9	616	1051	1.76	11.4	131 ± 12	127 ± 11	130 ± 17	48.9	9.0	0.067	17	0.190	19	0.0205	9.0
DD17_1_10	178	208	1.20	3.57	136 ± 13	127 ± 12	126 ± 18	46.8	9.3	0.101	16	0.299	18	0.0214	9.3
DD17_1_11	605	926	1.58	10.6	125 ± 12	122 ± 11	121 ± 17	51.1	9.4	0.070	16	0.188	19	0.0196	9.4
DD17_1_12	531	448	0.87	9.88	131 ± 6	128 ± 5	117 ± 9	48.8	4.4	0.065	31	0.185	32	0.0205	4.4
DD17_1_13	765	1217	1.64	12.8	119 ± 5	119 ± 5	120 ± 6	53.6	4.1	0.047	30	0.121	31	0.0186	4.1
DD17_1_14	420	689	1.70	7.83	130 ± 6	132 ± 5	131 ± 8	49.2	4.4	0.032	58	0.091	58	0.0203	4.4
DD17_1_15	341	521	1.58	6.73	137 ± 6	135 ± 6	135 ± 9	46.6	4.4	0.059	20	0.175	21	0.0215	4.4
DD17_1_16	157	160	1.06	2.82	112 ± 15	122 ± 5	120 ± 7	57.1	13	-0.03	440	-0.06	440	0.0175	13
DD17_1_17	363	462	1.32	6.66	127 ± 5	127 ± 5	126 ± 7	50.4	4.1	0.047	36	0.128	37	0.0199	4.1

注: 误差为 1σ; Pb* 代表放射性成因铅; (1) 用测定的²⁰⁴Pb 校正普通铅; (2) 用假定的²⁰⁶Pb/²³⁸U - ²⁰⁷Pb/²³⁵U 年龄协和线校正普通铅; (3) 用假定的²⁰⁶Pb/²³⁸U - ²⁰⁸Pb/²³²Th 年龄协和线校正普通铅。

3 分析结果

部分测定锆石的阴极发光照片如图 3 所示。从图 3 中可以看出锆石的内部结构均匀, 都表现出条带状的均匀吸收。锆石多呈长条状, 具有典型岩浆锆石的特征, 表 1 中锆石的 Th/U 值(介于 0.87~1.77 之间) 也证明了这一点。本次对其中的 17 粒锆

石进行了 SHRIMP U₂₃₈Pb 定年分析, 所有的 U₂₃₈Pb 同位素分析数据都标定在图 4 中。

从表 1 和图 4 可以看出, 由²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb 校正的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄相近, 表明了谐和年龄的特征。该岩浆锆石的分析结果主要集中在谐和线上 117~ 143 Ma 之间(图 4), ²⁰⁶Pb/²³⁸U 的平均年龄值为 128.6 ± 5.1 Ma(²⁰⁴Pb 校正的结果)。该年龄代表了前任屯角闪岩的结晶年龄。

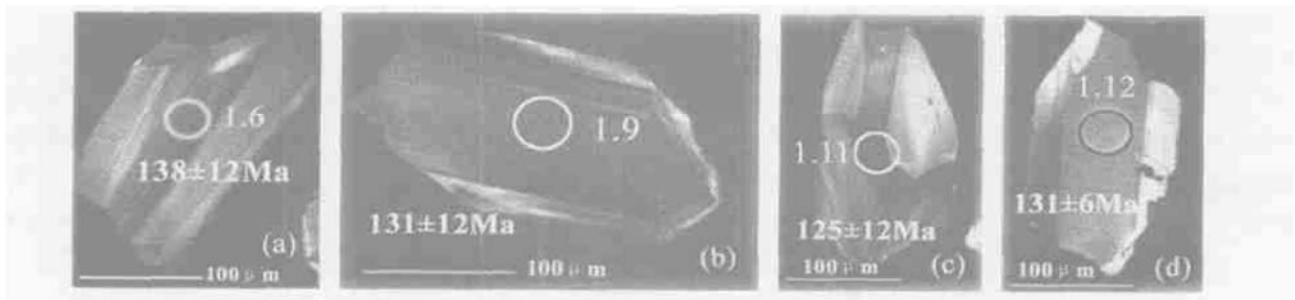


图 3 前任屯角闪岩中锆石的阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircons from Qianrentun amphibolite

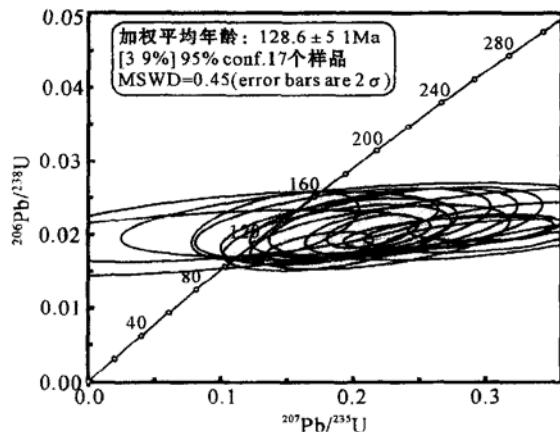


图4 前任屯角闪岩中锆石 SHRIMP U-Pb 谱和图
Fig. 4 Concordia diagram showing age data from SHRIMP U-Pb zircon dating of Qianrentun amphibolite

4 年代学的地质意义

华北克拉通东部显生宙岩石圈减薄过程主要发生在中生代,这已经被大多数地质学者所承认,但是,就具体的减薄时间与过程认识不一(Fan *et al.*, 1992, 2000; 邓晋福等, 1996; Menzies *et al.*, 1993, 1998; Griffin *et al.*, 1998; Gao *et al.*, 1998, 2002; 郑建平, 1999; 吴福元等, 1999, 2003; 许文良等, 2000; Xu X *et al.*, 2000; 路凤香等, 2000; Xu Y, 2001; Zhang *et al.*, 2002)。对岩石圈地幔减薄时间与过程的研究主要取决于中生代岩浆活动的时代以及幔源岩浆所反映的岩浆源区性质的变化。辽东地区中生代岩浆活动强烈,但岩浆活动时间框架的建立主要是依据20世纪70~80年代同位素年代学测定的结果,因其方法和测试精度问题造成定年结果误差较大。从本次前任屯角闪岩中锆石的阴极发光图像和 SHRIMP U-Pb 定年结果可以看出,岩浆的活动时代应为早白垩世,这与对该区花岗质岩石和辉长岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果(124~128 Ma, Wu *et al.*, 2005)相吻合,同时与华北克拉通东部中生代岩浆活动的定年结果(邱检生等, 2001; Qiu *et al.*, 2002; 罗振宽等, 2002; 靳克等, 2003; Xu *et al.*, 2004a; 许文

良等, 2004b; 裴福萍等, 2004)以及大别造山带中生代岩浆活动的定年结果相一致(戴圣潜等, 2003)。

从辽东和相邻地区,乃至中国东部早白垩世岩浆活动的岩石组合来看,辉长岩-花岗岩组合和玄武岩-流纹岩组合是这一时期岩浆作用的代表性岩石组合(林强等, 2003)。就前任屯岩体而言,岩性单一(辉石角闪岩),它与该区的朝阳镇辉长岩(早白垩世, Wu *et al.*, 2005)、安波镇南胡家口子含金云母橄榄辉石岩(131 ± 4 Ma, 许文良等, 2005 未发表资料)共同构成了辽东地区早白垩世的基性岩浆组合,它们代表了双峰式岩浆作用的基性岩石组合。依据实验岩石学的资料,这种基性岩浆的源区应是上地幔(Yoder and Tilley, 1962),而广泛分布的早白垩世花岗岩质岩石(124~128 Ma, Wu *et al.*, 2005)则代表了双峰式岩浆作用的另一端员分子——酸性岩石组合。从野外关系和锆石定年结果来看,早白垩世的基性岩浆组合应略早于酸性岩石组合。基性岩浆的形成与底侵和花岗质岩浆的产生密切相关,它们共同构成了中国东部早白垩世时期的双峰式岩石组合,进而反映了中国东部早白垩世时期强烈伸展环境的存在。早白垩世幔源与壳源岩浆的共存暗示着岩石圈地幔的厚度很薄,局部地方软流圈的顶面与地壳底部可能近于直接接触(吴福元等, 1999),这意味着岩石圈的减薄在早白垩世达到了峰期。此外,华北克拉通东部中生代火成岩中的榴辉岩类和橄榄岩类包体研究已经揭示,中生代早期华北克拉通东部曾存在一次重要的陆壳加厚过程,相继出现的板片断离以及加厚岩石圈的拆沉反映了岩石圈减薄的开始(许文良等, 2002)。华北克拉通东部中晚侏罗世(155~160 Ma)花岗岩的形成反映了造山期后伸展环境的存在(许文良等, 2004c; Guo *et al.*, 2005^①)。到早白垩世,断离的板片和/或拆沉的岩石圈(岩石圈地幔+深部地壳)与软流圈的混熔是该期岩浆作用(高 Mg 火成岩)的主要地球化学特点(Gao *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2005^②)。同时基性岩浆的底侵引起了深部地壳物质的熔融,从而形成了早白垩世的双峰式岩浆作用。早白垩世的双峰式岩浆作用代表了岩石圈减薄的峰期。晚白垩世碱性玄武岩中地幔橄榄岩包体所显示的早白垩世—晚白垩世(112

① Guo J H, Chen F K, Siebel W, *et al.* 2005. Crustal structure and tectonics in post UHP collisional environment of the Sulu orogen, eastern China: implications for SHRIMP zircon U-Pb dating on Jurassic granites[J]. Terra Nova (in press).

② Xu W L, Wang Q H, Wang D Y, *et al.* 2005. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust[J]. J. Asian Earth Sci. (revised).

~ 92 Ma) 之间的岩石圈地幔增生特征也证明了上述认识(许文良等, 2004d)。

致谢: 衷心感谢河北省廊坊地调院实验室李林庆主任在样品分离和挑选过程中给予的帮助, 同时感谢北京离子探针中心王彦斌和刘敦一研究员在锆石 SHRIMP U₂₃₈/Pb 分析中给予的支持。

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province. 1989. Regional Geology of Liaoning Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Dai Shengqian, Deng Jinfu, Wu Zongxu, *et al.* 2003. Evidence of magmatic petrology for the Yanshanian orogeny in the Dabie orogen[J]. *Geology in China*, 30(2): 159~165 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, *et al.* 1996. Continental Root - Mantle Tectonics in China: A Key to Continental dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~97 (in Chinese with English abstract).
- Fan W and Menzies M A. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 16: 171~180
- Fan W, Zhang H, Baker J, *et al.* 2000. On and off the north China craton: where is the Archaean keel[J]? *J. Petrol.*, 41(7): 933~950.
- Gao S, Lu T C, Zhang B R, *et al.* 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 62: 1959~1975.
- Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, *et al.* 2002. Re₁₈₇/Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton [J]. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 198: 307~322.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 432: 892~897.
- Griffin W L, Zhang A, O'Reilly S Y, *et al.* 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton[A]. Flower M F J, Chung S L, Lo C H, *et al.* Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia[C]. American Geophysical Union, Geodynamics Series 27, 107~126.
- Jin Ke, Xu Wenliang, Wang Qinghai, *et al.* 2003. Formation time and sources of the Huaiguang "migmatitic granodiorite" in Bengbu, central China: evidence from SHRIMP zircon U₂₃₈/Pb geochronology [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(4): 331~335 (in Chinese with English abstract).
- Lin Qiang, Ge Wenchun, Cao Lin, *et al.* 2003. Geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in Da Hinggan Ling: The bimodal volcanic rocks [J]. *Geochemica*, 32(3): 208~222 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Li Wuping, *et al.* 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle evolution in the eastern China: The "mushroom cloud" model[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(1): 97~107 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhenkuan and Miao Laicheng. 2002. Granites and Gold Deposits in Zhaoyuan-Laizhou Area, Eastern Shandong Province[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 20~57 (in Chinese).
- Menzies M A, Fan W and Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of 120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China [A]. Prichard H M, Alabaster T, Harris N B, *et al.* Magmatic Processes and Plate Tectonics [C]. Geological Society of London Special Publication, 76: 71~81.
- Menzies M A and Xu Y. 1998. Geodynamics of the North China craton [A]. Flower M F J, Chung S L, Lo C H, *et al.* Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia[C]. American Geophysical Union, Geodynamics Series 27, 100: 155~164.
- Pei Fuping, Xu Wenliang, Wang Qinghai, *et al.* 2004. Mesozoic basalt and mineral chemistry of the mantle-derived xenocrysts in Feixian, western Shandong, China: constraints on nature of Mesozoic lithospheric mantle[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 88~97 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Luo Qinghua, *et al.* 2001. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating for volcanic rocks of Qingshan formation in Jiaolai basin, eastern Shandong province: A case study of the Fenliangshan volcanic apparatus in Wulian County[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 351~355 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Xu Xisheng & Lo C H. 2002. Potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province: ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating and source tracing[J]. *Chinese Sci. Bull.*, 47(2): 91~96.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48(Sup): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[A]. McKibben M A, Shanks W C, Ridley W I. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes[C]. Review of Economic Geology, 7: 1~35.
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou, *et al.* 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51~60 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, *et al.* 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233: 103~119.
- Wu Fuyuan and Sun Deyou. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4): 313~318 (in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Wang D Y, Liu X C, *et al.* 2002. Discovery of eclogite inclusions and its geological significance in early Jurassic intrusive complex in Xuzhou - northern Anhui, eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(14): 1212~1216.
- Xu Wenliang, Wang Dongyan and Wang Simin. 2000. P-T-t model of Mesozoic and Cenozoic volcanism and lithospheric evolution [J].

- Journal of Changchun University of Science and Technology, 30(4): 329~ 335 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Wang Qinghai, Liu Xiaochun, *et al.* 2004a. Chronology and sources of Mesozoic intrusive complex in Xu_Huai region, central China: Constraints from SHRIMP zircon U_Pb dating [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 96~ 106.
- Xu Wenliang, Wang Dongyan, Wang Qinghai, *et al.* 2004b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of hornblende and biotite in Mesozoic intrusive complex from the North China Block: Constraints on the time of lithospheric thinning [J]. *Geochemica*, 33(3): 221~ 231 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wengliang, Wang Qinghai, Liu Xiaochun, *et al.* 2004c. SHRIMP zircon U_Pb dating in Jingshan "migmatitic granite", Bengbu and its geological significance [J]. *Chinese Science (D series)*, 34(5): 423~ 428 (in Chinese).
- Xu W L, Wang Q H, Wang D Y, *et al.* 2004d. Processes and mechanism of Mesozoic lithospheric thinning in eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic igneous rocks and deep-seated xenoliths [J]. *Earth Science Frontiers*, 11: 309~ 317 (in Chinese with English abstract).
- Xu X S, O' Reilly S Y, Griffin W L, *et al.* 2000. Genesis of young lithospheric mantle in southeastern China: an LAM-ICPMS trace element study [J]. *J. Petrol.*, 41(1): 111~ 148.
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithosphere, keel beneath the Sino-Korean Craton in China: evidence, timing and mechanism [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26A: 747~ 757.
- Yoder H S and Tilley C E. 1962. Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock system [J]. *J. Petrol.*, 3, 346~ 532.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, *et al.* 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from major trace element and Sr_Nd_Pb isotopic studies of Fangcheng basalts [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144: 241~ 253.
- Zheng Jianping. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning Beneath the Eastern China [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1~ 126 (in Chinese with English abstract).
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 1996. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙 [M]. 北京: 地质出版社, 1~ 97.
- 靳克, 许文良, 王清海, 等. 2003. 蚌埠淮光“混合花岗岩”的形成时代及源岩: 锆石 SHRIMP U_Pb 地质年代学证据 [J]. *地球学报*, 24(4): 331~ 335.
- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1~ 856.
- 路凤香, 郑建平, 李伍平, 等. 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: “蘑菇云”模型 [J]. *地学前缘*, 7(1): 97~ 107.
- 罗振宽, 苗来成. 2002. 胶东招莱地区花岗岩和金矿床 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 20~ 57.
- 林强, 葛文春, 曹林, 等. 2003. 大兴安岭中生代双峰式火山岩的地球化学特征 [J]. *地球化学*, 32(3): 208~ 222.
- 邱检生, 王德滋, 罗清华, 等. 2001. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年——以五莲分岭山火山机构为例 [J]. *高校地质学报*, 7(3): 351~ 355.
- 裴福萍, 许文良, 王清海, 等. 2004. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学——对岩石圈地幔性质的制约 [J]. *高校地质学报*, 10(1): 88~ 97.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论 [J]. *地质评论*, 48(增刊): 26~ 30.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题 [J]. *地学前缘*, 10(3): 51~ 60.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄 [J]. *长春科技大学学报*, 29(4): 313~ 318.
- 许文良, 王冬艳, 刘晓春, 等. 2002. 徐淮地区早侏罗世侵入杂岩体中榴辉岩类包体的发现及其地质意义 [J]. *科学通报*, 47(8): 618~ 622.
- 许文良, 王冬艳, 王清海, 等. 2004b. 华北克拉通中东部中生代侵入杂岩中角闪石和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年: 对岩石圈减薄时间的制约 [J]. *地球化学*, 33(3): 221~ 231.
- 许文良, 王冬艳, 王嗣敏. 2000. 中国东部中生代火山作用的 PT-t 模型与岩石圈演化 [J]. *长春科技大学学报*, 30(4): 329~ 335.
- 许文良, 王清海, 王冬艳, 等. 2004d. 华北克拉通东部中生代岩石圈减薄的过程与机制: 中生代火成岩和深源捕虏体证据 [J]. *地学前缘*, 11: 309~ 317.
- 许文良, 王清海, 杨德彬, 等. 2004c. 蚌埠荆山“混合花岗岩” SHRIMP 锆石 U_Pb 定年及其地质意义 [J]. *中国科学(D辑)*, 34(5): 423~ 428.
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1~ 126.

附中文参考文献

- 戴圣潜, 邓晋福, 吴宗絮, 等. 2003. 大别造山带燕山期造山作用的岩浆岩石学证据 [J]. *中国地质*, 30(2): 159~ 165.