

# 鲁西中生代高Mg闪长岩的成因： 年代学与岩石地球化学证据

杨承海<sup>1,2</sup>, 许文良<sup>1</sup>, 杨德彬<sup>1</sup>, 刘长春<sup>2</sup>, 柳小明<sup>3</sup>, 胡兆初<sup>3</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 山东省地质矿产局, 山东济南 250013

3. 西北大学大陆动力学重点实验室, 陕西西安 710069

**摘要:** 鲁西高Mg闪长岩分布较为广泛, 莱芜铁铜沟岩体和淄博金岭岩体是其典型代表。铁铜沟岩体早期苏长辉长岩和晚期辉石闪长岩、金岭黑云母闪长岩的LA-ICPMS U-Pb谐和加权平均年龄分别为(131.4±4.9)Ma( $n=15$ )、(134.5±2.3)Ma( $n=13$ )和(132.8±4.2)Ma( $n=12$ ), 它们代表了岩体的侵位结晶年龄——早白垩世。铁铜沟岩体晚期辉石闪长岩中浑圆状锆石的LA-ICPMS U-Pb谐和年龄为(2513±54)Ma( $n=8$ ), 代表了华北克拉通基底的存在。该类岩石以高Mg<sup>#</sup>(>60)、富钠、富含轻稀土元素、贫重稀土元素以及高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf)的明显亏损为特征, 显示埃达克岩(adakite)的特征。该类岩石中地幔橄榄岩包体的广泛存在以及高Mg<sup>#</sup>的特征表明原始岩浆的地幔成因, 而Sr-Nd同位素组成( $I_{sr}$ 为0.70475~0.70772和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为-3.95~-13.30)和高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf)的亏损以及太古代继承锆石的存在均暗示岩浆源区应有陆壳物质的涉入。铁铜沟岩体和金岭岩体闪长岩成分的差异应归因于岩浆源区性质的差异和部分熔融程度的不同。基于该类岩石的地球化学和所含包体, 同时结合华北克拉通东部中生代早期岩石圈演化历史, 可以认为鲁西中生代早白垩世高Mg闪长岩的形成应为拆沉的岩石圈(地幔+下地壳)与软流圈混熔的产物。

**关键词:** 高Mg闪长岩; 年代学; 地球化学; 中生代; 鲁西。

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2006)01-0081-12

收稿日期: 2005-10-18

## Petrogenesis of the Mesozoic High-Mg Diorites in West Shandong: Evidence from Chronology and Petro-geochemistry

YANG Cheng-hai<sup>1,2</sup>, XU Wen-liang<sup>1</sup>, YANG De-bin<sup>1</sup>, LIU Chang-chun<sup>2</sup>,  
LIU Xiao-ming<sup>3</sup>, HU Zhao-chu<sup>3</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan 250013, China

3. Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwestern University, Xian 710069, China

**Abstract:** High-Mg diorites occur widely in western Shandong: the Tietonggou and Jinling intrusions are typically representative. The weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages from LA-ICPMS zircon U-Pb dating results for early norite-diorite, late pyroxene-diorite from the Tietonggou intrusion and biotite-diorite from the Jinling intrusion are (131.4±4.9) Ma ( $n=15$ ), (134.5±2.3) Ma ( $n=13$ ), (132.8±4.2) Ma ( $n=12$ ), respectively, implying that they were formed in the Early Cretaceous. The weighted mean  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age for round zircons from late pyroxene-diorite from the Tietonggou intrusion is (2513±54) Ma ( $n=8$ ), suggesting that the basement of the North China craton should exist in the research area. The high-Mg diorites are characterized by enrichment in Mg<sup>#</sup>, Na, and light rare earth elements (LREE). They are poor in heavy rare earth elements (HREE) and high field strength elements (HFSE), being similar to adakite. The occurrence of the mantle peridotite xenoliths and the high-Mg feature for these intrusive rocks imply that their primary magma should be derived

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 40472033; 40133020); 西北大学大陆动力学重点实验室开放实验室基金项目。

作者简介: 杨承海(1964—), 男, 高工, 博士研究生, 主要从事火成岩石学研究。通信作者: 许文良, E-mail: xuwl@263.net

from the upper mantle. However, Sr-Nd isotopic compositions ( $I_{\text{sr}}: 0.70475 - 0.70772$ ;  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values:  $-3.95$  to  $-13.30$ ), depletion in HFSE, and the occurrence of the Archean inherited zircons suggest that crustal materials be involved in the derivation of primary magma. The compositional difference between the diorites from the Tietonggou and Jinling intrusions could be attributed to magma sources and partial melting degrees. It is considered that the Early Cretaceous high-Mg diorites were formed by the mixed melting of the delaminated lithosphere (lithospheric mantle+crust) and asthenosphere, based on their geochemistry, the mantle-derived xenoliths, and the Early Mesozoic lithospheric evolutionary history of the eastern North China craton.

**Key words:** high-Mg diorite; chronology; geochemistry; Mesozoic; West Shandong.

华北克拉通东部以其特殊的大地构造位置以及广泛出露的中生代岩浆岩,已经成为研究华北克拉通中生代大陆岩石圈形成与演化的一个天然实验室(Menzies and Xu, 1998; Griffin *et al.*, 1998; 吴福元和孙德有,1999; 许文良等,1999, 2000, 2003, 2004; Zhang *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2004; 裴福萍等,2004; Wu *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2005).然而,在中生代岩浆作用与岩石圈性质和减薄时间的关系研究中,鲁西高镁闪长岩的研究占有重要位置。虽然以往进行过年代学和地球化学研究,但因测试方法和精度的制约,使其对该类岩浆作用的形成时代和成因认识不一(山东省地质矿产局第四地质研究院,2003; 许文良等,2004a, 2004b). 本文报道了鲁西莱芜铁铜沟辉石闪长岩和淄博金岭黑云母闪长岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果和岩石地球化学特征,并讨论了该类岩石的成因。

## 1 地质概况和岩体地质

鲁西地区位于华北克拉通的东部,郯庐断裂带以西,东南与苏鲁—大别超高压碰撞带相接。区内地层主要为太古代泰山群、古生代寒武系、中下奥陶统和石炭—二叠系。中生代主要为断陷盆地沉积,新生代为河湖相沉积。该区除广泛分布前寒武纪岩浆岩外,中生代侵入岩也较为发育。本文研究的莱芜铁铜沟岩体以及淄博金岭岩体是其典型代表(图 1)。

莱芜铁铜沟岩体分布于莱芜东南颜庄铁铜沟一带,岩体出露面积约  $7 \text{ km}^2$ , 主要由早期苏长闪长岩和晚期的辉石闪长岩构成, 虽然野外可见到辉石闪长岩包裹苏长闪长岩的现象, 但二者没有烘烤现象, 表明它们的形成时间相近。苏长闪长岩呈灰黑色、辉长辉绿结构、块状构造, 主要矿物为斜长石、普通角闪石、紫苏辉石和单斜辉石, 少量黑云母, 副矿物为磁铁矿和锆石; 辉石闪长岩呈半自形粒状结构, 块状

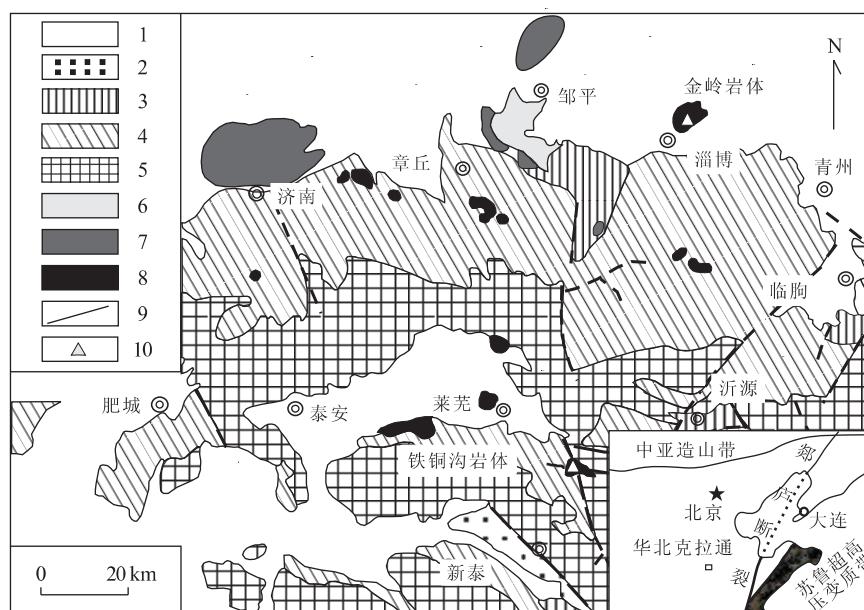


图 1 鲁西地区地质略图

Fig. 1 Sketch geologic map of West Shandong

1. 第四系; 2. 第三系; 3. 中生界; 4. 古生界; 5. 太古界; 6. 中生代青山期火山岩; 7. 辉长岩; 8. 高镁闪长岩; 9. 断层; 10. 采样点

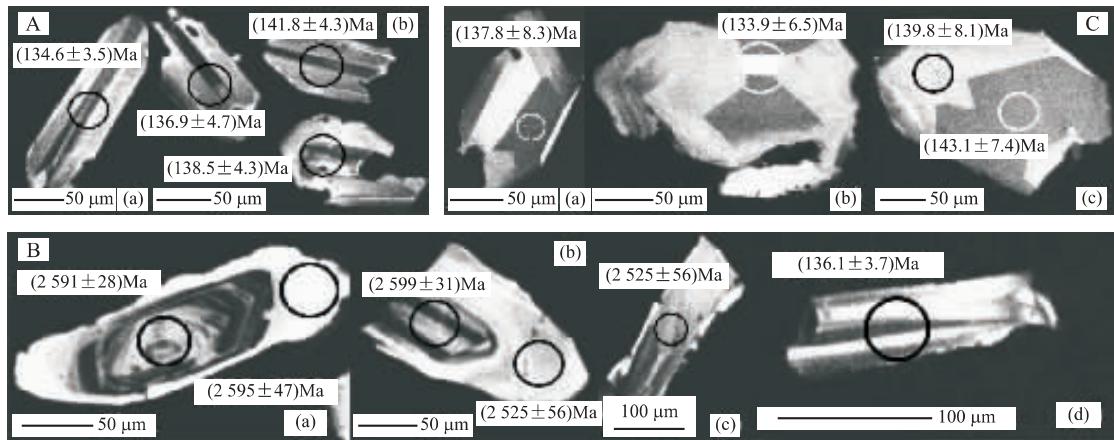


图2 鲁西高镁闪长岩中锆石的阴极发光(CL)图像

Fig. 2 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircons from the high-Mg diorite in West Shandong

A. 铁铜沟岩体苏长闪长岩中的锆石的阴极发光(CL)图像; B. 铁铜沟岩体辉石闪长岩中的2种锆石的阴极发光(CL)图像; C. 金岭岩体黑云母闪长岩中锆石的阴极发光(CL)图像

构造。主要组成矿物为斜长石和普通角闪石,其次为单斜辉石、黑云母及少量石英和正长石。苏长闪长岩与辉石闪长岩的主要差别在于前者中含有较多的紫苏辉石,后者则以单斜辉石为主。岩石中含有丰富的辉石岩和橄榄岩类包体(许文良等,2003)。岩体侵位受近东西向断裂和近南北向断裂的交汇部位控制(图1)。岩体侵入的围岩主要为太古代的古老变质岩及奥陶纪的碳酸盐岩,岩体的东南侧被晚期的花岗闪长岩所侵入。山东省区域地质志(2003)将其形成时代确定为中生代燕山晚期(山东省地质矿产局第四地质研究院,2003)。

淄博金岭岩体位于淄博张店区花山一带,出露面积约7 km<sup>2</sup>。主要由中细粒黑云母闪长岩和辉石闪长岩构成。黑云母闪长岩呈灰黑色,中细粒半自形结构,块状构造,主要由斜长石(69%)、普通角闪石(13%)和黑云母(7%)构成,其次为石英和钾长石,副矿物为磁铁矿、磷灰石和锆石。岩石中含有较多的幔源辉石岩和橄榄岩包体。岩体的形态和展布方向严格受北东向倾伏的短轴背斜控制。围岩为中奥陶统的灰岩和石炭—二叠系的砂页岩。黑云母闪长岩中角闪石和黑云母的K-Ar同位素年龄主体介于112~129 Ma<sup>①</sup>。山东省区域地质志(2003)依据其与地层和其他岩体接触关系将其形成时代确定为中生代燕山晚期(山东省地质矿产局第四地质研究院,2003)。

## 2 年代学

### 2.1 分析方法

用常规方法将锆石样品粉碎,并用浮选和电磁选方法进行分选,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒,然后将其与标准锆石91500和TEMORA 1一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。通过对阴极发光图像分析,选择吸收程度均匀的区域进行分析。应用标准锆石91500进行分馏校正。锆石U-Pb同位素分析在西北大学大陆动力学重点实验室的LA-ICPMS仪器上用标准测定程序进行。详细的实验原理和流程见参考文献(Yuan et al., 2004)。利用本方法对标准锆石TEMORA 1作为未知样品测定获得的年龄为(415±4)Ma(MSWD=0.112, n=24)(Yuan et al., 2004),该锆石的ID-TIMS年龄为(416.75±0.24)Ma(Black et al., 2003)。激光束的束斑为30 μm。实验获得的数据采用Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通Pb的影响。

### 2.2 测定结果

鲁西高镁侵入岩测定锆石的阴极发光图像如图2所示。从图2中可以看出,铁铜沟早期相苏长闪长岩(图2A)和金岭黑云母闪长岩(图2C)中的锆石以及铁铜沟辉石闪长岩中的部分锆石(图2B-c,d)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。此外,铁铜沟辉

<sup>①</sup>山东省地矿局地质综合研究队和实验室,1985. 山东省岩浆岩研究报告.





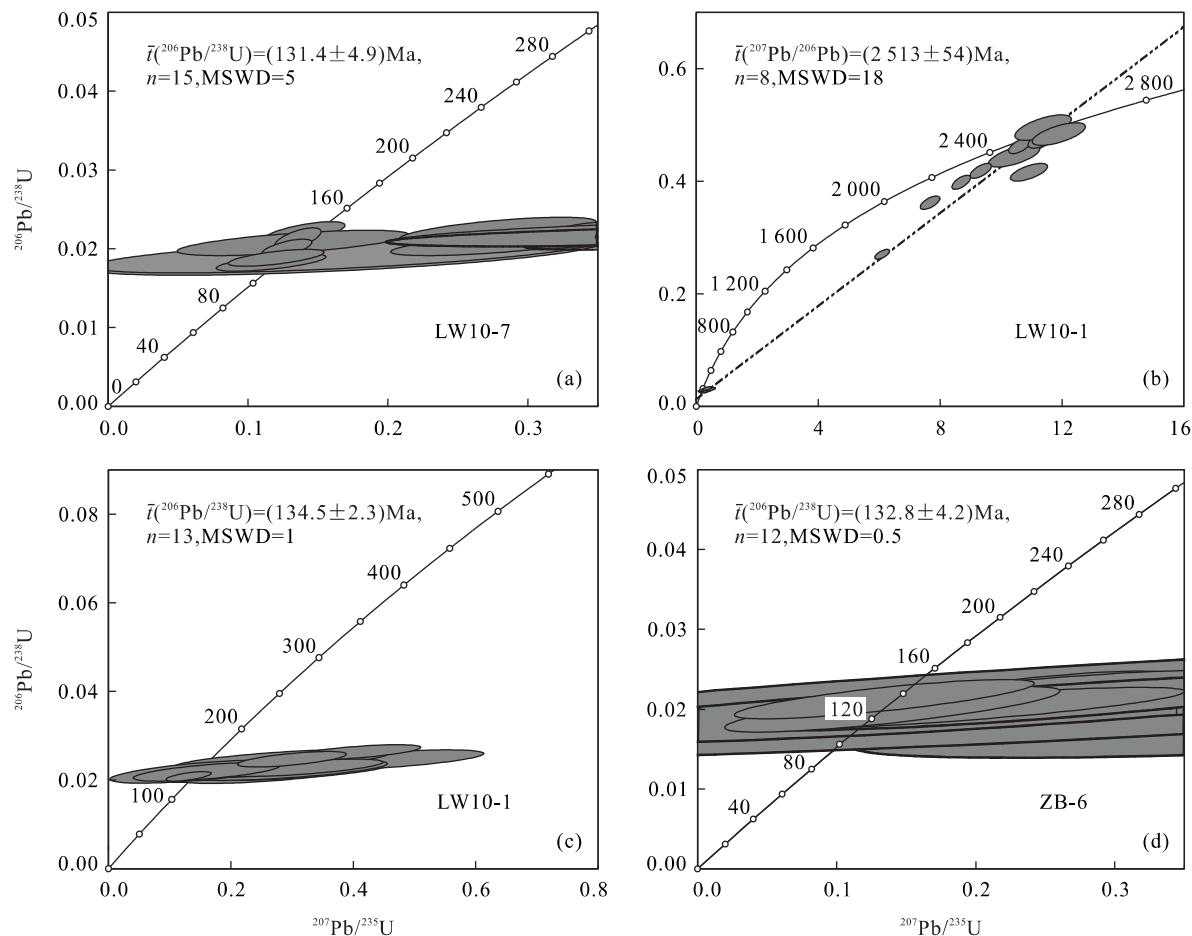


图 3 鲁西中生代高 Mg 闪长岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 谐和图

Fig. 3 Concordia diagram showing age data from LA-ICPMS U-Pb zircon dating of the high-Mg diorites in West Shandong  
a. 莱芜铁铜沟岩体早期苏长闪长岩; b. 莱芜铁铜沟岩体辉石闪长岩;c. 为图 b 的底部放大;d. 金岭岩体黑云母闪长岩

石闪长岩中的部分锆石呈浑圆状，并具有核边结构（图 2B-a,b）。本次对鲁西高镁闪长岩中的 69 粒锆石进行了 LA-ICPMS U-Pb 定年分析，结果见表 1。所有的 U-Pb 同位素分析数据都标注在图 3 中。

从表 1 和图 2、图 3 中可以看出，铁铜沟岩体早期苏长闪长岩中多数锆石 LA-ICPMS U-Pb 的定年结果  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄介于  $(119 \pm 3) \sim (142 \pm 4)$  Ma 之间，15 个样品的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $(131.4 \pm 4.9)$  Ma（图 3a）；铁铜沟岩体晚期辉石闪长岩中阴极发光图像呈条纹状吸收锆石的 LA-ICPMS U-Pb 定年结果  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄介于  $(129 \pm 3) \sim (142 \pm 5)$  Ma 之间，这 13 个样品的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $(134.5 \pm 2.3)$  Ma（图 3c）；而浑圆状锆石的 LA-ICPMS U-Pb 谐和年龄  $(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})$  为  $(2513 \pm 54)$  Ma（图 3b）；金岭岩体黑云母闪长岩中锆石主体的 LA-ICPMS U-Pb 定年结果  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄介于  $(128 \pm 5) \sim (141 \pm 7)$  Ma 之间，这 12 个样

品的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $(132.8 \pm 4.2)$  Ma（图 3d）。

### 3 岩石地球化学特征

#### 3.1 主量元素

表 2 列出了铁铜沟岩体和金岭岩体的主要元素、微量元素和同位素的分析数据。本区辉长闪长质岩石  $\text{SiO}_2$  含量在  $54\% \sim 60\%$ ， $\text{TiO}_2$  含量在  $0.56\% \sim 1.05\%$ ， $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量在  $12\% \sim 15\%$ ， $\text{MgO}$  含量高达  $5.98\% \sim 9.76\%$ ，其  $\text{Mg}^\#$  值 ( $\text{Mg}^\# = \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ ) 介于 63 ~ 68 之间， $\text{Na}_2\text{O}$  变化于  $3.32\% \sim 3.81\%$  之间， $\text{K}_2\text{O}$  变化于  $1.35\% \sim 2.55\%$  之间， $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  比值介于  $1.41 \sim 2.73$  之间。该类岩石在硅—碱图上均为亚碱性系列（图 4），所表现出的富钠、高镁，与 Adakite 具有相似的特征。

表2 鲁西中生代高镁闪长岩的主量、微量元素含量和Sr-Nd同位素组成

Table 2 Elemental content and Sr-Nd isotopic composition of the Mesozoic high-Mg diorites from West Shandong

样号	莱芜铁铜沟								淄博金岭			
	LW10-1	LW10-7	LW11-1	LW11-2	LW11-3	LW11-5	LW11-13	LW11-14	ZB7-1	ZB7-3	ZB7-6	ZB7-9
SiO <sub>2</sub>	59.22	56.72	56.86	57.20	57.14	59.17	59.75	59.34	54.00	54.89	54.88	54.97
TiO <sub>2</sub>	0.56	0.64	0.65	0.62	0.64	0.58	0.56	0.56	0.94	1.05	1.05	1.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.35	14.38	14.31	14.33	14.26	14.79	14.59	14.60	12.92	12.23	12.33	12.88
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.37	7.93	7.81	7.52	7.64	6.42	6.29	6.25	9.03	8.87	8.71	8.76
MnO	0.09	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.12	0.12	0.11	0.11
MgO	6.34	6.84	6.80	6.72	6.70	5.98	6.06	6.21	9.76	9.03	8.89	8.10
CaO	5.58	7.41	7.09	6.97	6.95	5.58	5.51	5.59	7.43	7.06	6.71	6.55
Na <sub>2</sub> O	3.59	3.37	3.39	3.48	3.44	3.81	3.71	3.71	3.68	3.32	3.42	3.48
K <sub>2</sub> O	2.55	1.82	1.96	2.03	2.07	2.35	2.44	2.42	1.35	2.12	2.20	2.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.23	0.22	0.21	0.21	0.22	0.19	0.19	0.37	0.41	0.39	0.37
LOI	0.89	0.45	0.52	0.57	0.64	1.06	0.74	1.28	0.23	0.70	0.90	1.08
总量	99.73	99.90	99.71	99.75	99.79	100.05	99.93	100.24	99.83	99.80	99.59	99.51
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1.41	1.85	1.73	1.71	1.66	1.62	1.52	1.53	2.73	1.57	1.55	1.60
Mg <sup>#</sup>	66.4	63.1	63.3	63.9	63.5	64.9	65.6	66.3	68.2	66.9	66.9	64.7
Li	32.7	24.9	26.3	26.0	23.9	33.5	35.3	32.8	21.2	24.1	27.1	24.8
Be	2.14	1.52	1.60	1.64	1.70	1.89	2.12	1.96	1.44	1.49	1.40	1.35
Sc	20.2	27.9	27.0	26.6	26.6	20.1	21.0	19.4	29.6	26.7	25.6	23.7
V	145	189	185	175	181	147	151	142	213	203	198	193
Cr	469.7	377.2	362.6	391.1	393.5	407.1	475.8	447.5	718	598	619	481.6
Co	73	69	83	77	77	75	69	75	74	72	71	65
Ni	155	93	98	102	102	135	145	146	261	253	256	210
Cu	36.6	70	47.0	31.0	36.8	14.2	29.4	26.7	34.6	47.3	47.8	37.2
Zn	69.4	78.1	77.0	75.2	77.6	62.6	71.9	66.5	99	130	96	128
Ga	20.1	19.1	19.2	19.3	19.2	19.9	20.5	19.3	18.0	18.2	17.7	17.8
Ge	1.43	1.47	1.43	1.38	1.41	1.33	1.46	1.36	1.57	1.54	1.52	1.46
Rb	77.7	48.94	51.66	56.0	54.4	68.1	73.6	67.1	36.17	50.01	51.41	45.61
Sr	599	600	593	580	579	660	594	598	660	679	654	664
Y	14.0	15.6	15.5	19.5	15.6	16.8	14.6	16.5	22.4	22.2	21.7	21.0
Zr	88.8	71.7	81.2	63.5	76.2	86.2	118	93.0	111.3	95.2	69.1	73.0
Nb	6.88	5.35	5.43	6.08	5.98	7.16	7.06	6.91	9.3	10.1	10.4	10.0
Cs	2.27	2.44	2.80	3.14	2.97	2.18	3.47	1.54	1.51	1.74	1.38	1.63
Ba	881	749.0	779	733.1	820	937	894	874	849	907	964	931
La	23.4	21.9	21.9	22.8	22.1	26.1	23.9	23.7	27.9	28.1	27.4	25.1
Ce	45.5	44.4	44.1	45.8	45.0	51.4	46.1	45.5	60.4	61.1	59.8	55.1
Pr	5.01	5.16	5.09	5.18	5.19	5.81	5.07	4.96	7.35	7.53	7.26	6.80
Nd	20.2	21.8	21.4	21.5	21.7	24.0	20.4	20.0	32.0	33.3	31.9	29.9
Sm	3.93	4.34	4.20	4.17	4.25	4.62	3.87	3.81	6.55	7.05	6.67	6.17
Eu	1.13	1.25	1.22	1.19	1.21	1.28	1.13	1.13	1.82	2.02	1.94	1.80
Gd	3.49	3.78	3.74	3.76	3.78	4.15	3.54	3.43	5.92	6.36	6.06	5.64
Tb	0.45	0.52	0.50	0.49	0.50	0.55	0.46	0.45	0.78	0.84	0.80	0.75
Dy	2.33	2.71	2.61	2.62	2.63	2.89	2.43	2.36	3.95	4.16	3.97	3.76
Ho	0.45	0.52	0.51	0.50	0.50	0.55	0.47	0.45	0.72	0.74	0.71	0.71
Er	1.17	1.38	1.32	1.33	1.34	1.45	1.25	1.20	1.81	1.82	1.75	1.71
Tm	0.17	0.20	0.19	0.19	0.20	0.21	0.18	0.17	0.25	0.25	0.24	0.24
Yb	1.17	1.35	1.32	1.30	1.32	1.38	1.24	1.19	1.70	1.62	1.56	1.57
Lu	0.18	0.21	0.21	0.20	0.21	0.21	0.20	0.19	0.25	0.24	0.24	0.23
Hf	2.62	2.12	2.47	2.03	2.31	2.61	3.28	2.80	3.04	2.71	2.19	2.24
Ta	0.57	0.37	0.39	0.43	0.42	0.50	0.51	0.50	0.62	0.63	0.65	0.63
Pb	16.59	15.58	16.27	17.00	17.09	13.62	18.31	15.49	8.67	20.27	9.33	23.61
Th	7.54	5.01	5.26	6.30	6.13	6.21	7.72	7.13	4.06	3.20	3.07	3.06
U	1.16	1.53	1.67	1.95	1.89	1.62	1.54	1.26	1.04	0.82	0.70	0.75

续表 2

样号	莱芜铁铜沟									淄博金岭		
	LW10-1	LW10-7	LW11-1	LW11-2	LW11-3	LW11-5	LW11-13	LW11-14	ZB7-1	ZB7-3	ZB7-6	ZB7-9
Sr/Y	42.96	38.46	38.18	29.66	37.07	39.19	40.57	36.15	29.52	30.54	30.15	31.66
La/Yb	20.03	16.27	16.52	17.54	16.84	18.99	19.27	19.87	16.40	17.29	17.59	16.01
Nb/La	0.30	0.24	0.25	0.27	0.2	0.27	0.30	0.29	0.33	0.36	0.39	0.400
REE	122.53	125.11	123.83	130.66	125.63	141.49	124.94	125.04	173.66	177.36	171.90	160.51
LREE	99.15	98.86	97.90	100.72	99.55	113.25	100.53	99.06	135.91	139.09	134.89	124.93
HREE	23.37	26.25	25.93	29.94	26.08	28.24	24.41	25.98	37.75	38.27	37.01	35.58
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0.70741	0.70720	0.70724	0.70750	0.70750	0.70770	0.70772	0.70763	0.70506	0.70548	0.70544	0.70512
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr(t)	0.70672	0.70677	0.70678	0.70699	0.70700	0.70715	0.70706	0.70703	0.70477	0.70508	0.70503	0.70475
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0.51217	0.51199	0.51201	0.51189		0.51211	0.51213	0.51213	0.51227	0.51238	0.51233	0.51225
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-7.82	-11.36	-11.03	-13.30		-9.02	-8.47	-8.48	-6.04	-3.95	-4.83	-6.45
$f_{\text{Sm/Nd}}$	-0.40	-0.39	-0.40	-0.40		-0.41	-0.42	-0.41	-0.37	-0.35	-0.36	-0.37
$T_{\text{DM}}$	1555	1893	1830	1987		1631	1560	1570	1498	1374	1429	1546

主量元素(%)、微量元素( $10^{-6}$ )和 Sr-Nd 同位素均在西北大学教育部大陆动力学重点实验室完成。分析方法: 主量元素, 大型 X-荧光光谱; 微量元素, 等离子质谱(ICP-MS); Sr-Nd 同位素, MC-ICPMS.

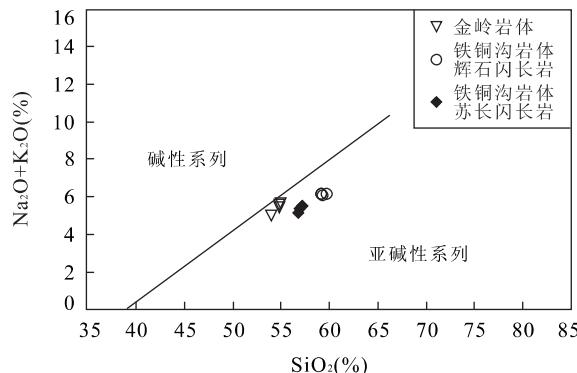


图 4 鲁西高镁闪长岩的  $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  变异图

Fig. 4  $\text{SiO}_2$  vs.  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  variation diagram for high-Mg diorites in West Shandong  
碱性和亚碱性之间的界限引自 Irvine and Baragar (1971)

### 3.2 微量元素

鲁西高 Mg 闪长岩的稀土元素的球粒陨石标准化曲线均显示出富含轻稀土元素(LREE)、贫重稀土元素(HREE)、具有微弱 Eu 的负异常特征(图 5a)。稀土元素总量为  $122.53 \sim 173.66 \mu\text{g/g}$ ,  $(\text{La})_{\text{N}}/(\text{Yb})_{\text{N}}$  介于  $16.0 \sim 20.0$  之间,  $\delta\text{Eu}$  值介于  $0.87 \sim 0.92$  之间。与铁铜沟岩体相比, 金岭岩体具有更高的 REE 丰度, 但二者的配分型式相似。该类岩石的 REE 丰度明显低于相邻方城和费县同时代玄武岩的 REE 丰度(Zhang et al., 2002; 裴福萍等, 2004)。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 5b), 该类岩石富含大离子亲石元素(Rb、Ba、Th), 而高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf)明显亏损。此外, U 和 Sr 具有正异常,  $\text{Sr}/\text{Y}$  介于  $29.5 \sim 43.0$  之间, 其特征有

别于岛弧系列火山岩, 与中国东部埃达克质岩石相类似(张旗等, 2001)。

高镁闪长岩中的过渡族元素 Sc、Co、Ni 的含量分别为  $(19.2 \sim 29.6) \times 10^{-3}$ 、 $(65 \sim 83) \times 10^{-3}$  和  $(93 \sim 261) \times 10^{-3}$ (表 2)。该值明显高于全国同类岩石的平均值。结合其  $\text{Mg}^{\#}$  值( $63 \sim 68$ ), 可以认为它们的基性端元具有地幔橄榄岩部分熔融形成的原始岩浆的成分特征(Frey et al., 1978)。

### 3.3 Sr-Nd 同位素

鲁西中生代高 Mg 闪长岩  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  值介于  $0.70475 \sim 0.70715$  之间,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化在  $-3.95 \sim -13.30$  之间。与铁铜沟岩体中的辉石闪长岩相比, 淄博金岭岩体黑云母闪长岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  值相对偏低( $0.70475 \sim 0.70508$ ), 而  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值偏高( $-3.95 \sim -6.45$ )(图 6), 这种 Sr-Nd 同位素组成明显不同于由俯冲大洋板片部分熔融形成的熔体的成分(Defant and Drummond, 1990), 而类似于下部大陆地壳和拆沉下部大陆地壳部分熔融形成的 adakite 岩石的 Sr-Nd 同位素组成(Petford and Atherton, 1996; Xu et al., 2002)。鲁西中生代高 Mg 闪长岩基本上都位于地幔演化趋势线上, 部分铁铜沟岩体中的辉石闪长岩与大别中生代镁铁质侵入岩具有相似的 Sr-Nd 同位素组成(Jahn et al., 1999), 而  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  值明显低于方城和费县中生代玄武岩(Zhang et al., 2002; 裴福萍等, 2004)。与原始地幔相比, 该类岩石表现出相对较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值和较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值, 这暗示在岩浆源区或岩浆侵位结晶过程中应有陆壳物质的涉入, 这也可从该类岩石相对富含  $\text{K}_2\text{O}$  和 LILE、亏损 HFSE 的特征得到印

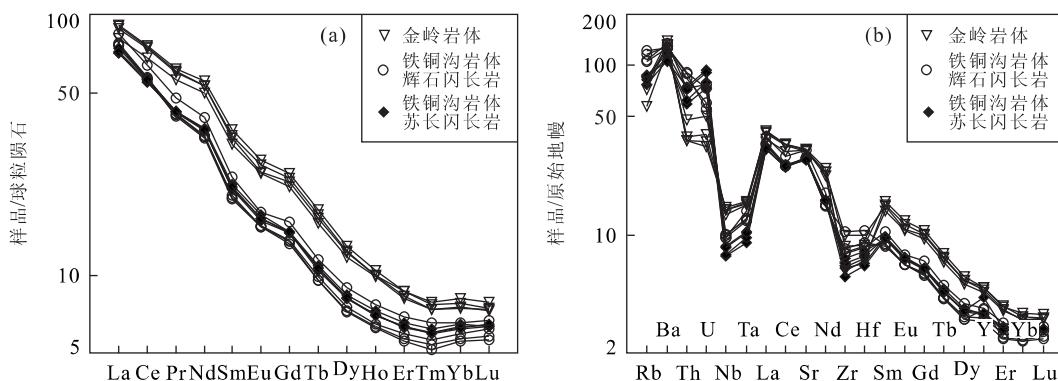


图5 鲁西高镁闪长岩的球粒陨石标准化REE配分型式(a)和原始地幔标准化的微量元素蛛网图(b)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) of high-Mg diorites from West Shandong

原始地幔标准化数据引自 Sun and McDonough(1989)

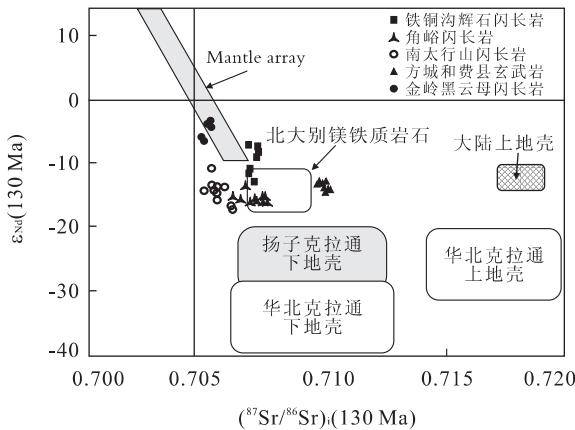


图6 鲁西中生代高Mg闪长岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 与 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$   
(130 Ma) 变异图

Fig. 6 Initial  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  vs.  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  (130 Ma) diagram for the Mesozoic high-Mg diorites in West Shandong

资料来源: 华北克拉通下地壳和上地壳引自 Jahn *et al.* (1999); 扬子克拉通下地壳引自 Chen and Jahn(1998); 大陆上地壳引自 Jahn *et al.* (1988); 角峪岩体引自 Xu *et al.* (2004)

证。所有样品 Nd 的模式年龄均位于 1374~1987 Ma 之间, 这进一步表明该类岩石的岩浆源区有古老陆壳物质的涉入。

## 4 讨论

### 4.1 高镁闪长岩的形成时代

从铁铜沟岩体、金岭岩体中锆石的阴极发光图像可以看出(图2), 锆石的自形一半自形晶形、均匀的条带状吸收特征均表明它们具有岩浆成因, 而对此所测定的 LA-ICPMS U-Pb 谱和年龄应代表岩浆

的结晶年龄。铁铜沟苏长闪长岩、辉石闪长岩和金岭黑云母闪长岩锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄分别为 $(131.4 \pm 4.9)\text{Ma}$  ( $n=15$ )、 $(134.5 \pm 2.3)\text{Ma}$  ( $n=13$ ) 和 $(132.8 \pm 4.2)\text{Ma}$  ( $n=12$ ) , 上述测定结果表明岩体的侵位结晶年龄为早白垩世。这与对鲁西中生代侵入岩所做的 Ar-Ar 定年结果 $(124 \sim 132)\text{Ma}$  (许文良等, 2004) 相吻合, 同时与华北克拉通东部(胶东和辽东)中生代侵入岩(辉长岩和花岗质岩石)中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年和 SHRIMP U-Pb 定年的结果相一致(罗振宽和苗来成, 2002; Xu *et al.*, 2004c; Wu *et al.*, 2005)。

### 4.2 岩浆源区及性质

鲁西中生代高镁闪长岩的成因一直是地质学者们争论的问题之一, 主要观点有 2 种: 一种认为该类岩石的岩浆起源于上地幔(许文良等, 1993, 2003, 2003b); 另一种认为该类岩石的岩浆主要起源于下地壳或壳—幔过渡带(Chen and Zhou, 2004)。该类岩石的地球化学特征和锆石的成因及年代学特征可以帮助我们了解鲁西中生代高镁闪长岩的成因。

鲁西中生代高Mg闪长岩中含有丰富的地幔橄榄岩包体(许文良等, 1993, 2003a), 这种特征暗示其寄主岩浆应起源于岩石圈地幔。该类岩石中的高Mg特征、富含过渡族元素(Sc, Co, Ni)也证明了上述认识。实验岩石学的成果也表明, 玄武质成分的原岩发生部分熔融并不能形成具有高Mg特征的埃达克岩(Rapp *et al.*, 1995)。然而, 铁铜沟岩体辉石闪长岩中少量具有晚太古代年龄的继承锆石的存在、该类岩石中高场强元素(Nb, Ta, Zr, Hf)的亏损以及 Sr-Nd 同位素的组成均表明岩浆起源或演化过

程中有古老地壳物质的参与。那么,幔源岩浆中陆壳物质涉入是在岩浆源区发生的还是在岩浆上升过程中发生的?鲁西中生代高 Mg 闪长岩中地幔橄榄岩包体的岩石地球化学研究表明,该类包体中普遍发育富硅质交代作用(许文良等,2004a),且具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值和较低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(许文良等,2003b),这种特征暗示陆壳物质的涉入应发生在岩浆源区。此外,与之相邻的方城和费县玄武岩,虽然具有地幔橄榄岩包体和捕虏晶,但仍具有异常高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值(0.710~0.712)和很低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值(-15~-20)(Zhang et al., 2002; 裴福萍等,2004),玄武质岩浆的快速喷发很难发生如此大的混染,岩浆源区中陆壳物质的涉入是其最佳解释。由此可以判定鲁西中生代含地幔包体的高镁辉长质—闪长质岩石的成因为起源于有少量陆壳物质涉入的上地幔的原始岩浆结晶演化的结果。

从主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素组成可以看出,铁铜沟岩体辉石闪长岩与金岭黑云母闪长岩具有一定差异,造成这种差异的原因应归因于岩浆源区性质的差异和部分熔融程度的不同。前者主要反映在 Sr-Nd 同位素组成上,后者则反映在 REE(尤其是 LREE) 丰度上,如金岭黑云母闪长岩 Sr-Nd 同位素组成更靠近原始地幔,而铁铜沟岩体辉石闪长岩的 Sr-Nd 同位素组成显示岩浆源区有更多的陆壳物质涉入。金岭黑云母闪长岩较高的 REE 丰度暗示岩浆形成过程中源区物质具有较低的部分熔融程度。

#### 4.3 鲁西中生代高镁闪长岩的成因

鲁西中生代高镁闪长岩与典型的埃达克岩石具有类似地球化学特征,这暗示在该类岩石形成之前,华北克拉通东部可能存在一次重要的陆壳加厚过程。这已经从近年来在徐淮地区中生代埃达克岩石中榴辉岩捕虏体的发现得到了证明(许文良等,2003b)。因榴辉岩捕虏体的高压—超高压变质的时间与大别—苏鲁超高压变质的时间基本相同,这一陆壳加厚过程应与扬子克拉通与华北克拉通之间中生代早期的俯冲碰撞事件相联系(许文良等,2003b)。断离的俯冲板片(扬子克拉通)和加厚岩石圈(华北克拉通)的拆沉必然因其较高的密度而进入到软流圈,这些榴辉岩捕虏体的部分熔融所产生的富硅质熔体必然造成对上部地幔橄榄岩的交代—即目前我们在这些地幔纯橄岩捕虏体中所见到的斜方辉石脉体就是最好的例证(许文良等,2004a;

Chen and Zhou, 2005). 上涌的软流圈物质与受交代地幔橄榄岩的部分熔融便产生了本区高 Mg 闪长质岩浆。

## 5 结论

(1) 鲁西中生代高镁辉长闪长质岩浆活动形成于中生代早白垩世,锆石 U-Pb 年龄介于 132~139 Ma 之间。(2) 鲁西中生代高镁闪长岩以高镁、富钠和富含轻稀土元素、贫重稀土元素和亏损高场强元素为特征,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  值介于 0.70475~0.70772 之间,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值变化在 -3.95~-13.30 之间。(3) 鲁西中生代高镁闪长岩的岩石地球化学和所含包体特征暗示其原始岩浆主要起源于上地幔橄榄岩的部分熔融,岩浆源区有少量陆壳物质的涉入。(4) 中生代早期断离的扬子克拉通俯冲板片和拆沉的岩石圈(下地壳+上地幔)与软流圈的混熔应是产生本区早白垩世高镁闪长质岩浆的主要动因。

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,同时感谢西北大学大陆动力学重点实验室在锆石 LA-ICPMS U-Pb 分析、主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素分析中给予的支持。

## References

- Andersen, T. , 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chem. Geol.*, 192: 59~79.
- Black, L. P. , Kamo, S. L. , Allen, C. M. , et al. , 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chem. Geol.*, 200: 155~170.
- Chen, J. F. , Jahn, B. M. , 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284: 101~133.
- Chen, L. H. , Zhou, X. H. , 2004. Ultramafic xenoliths in Mesozoic diorite in West Shandong Province. *Science in China (Series D)*, 47(6): 489~499.
- Chen, L. H. , Zhou, X. H. , 2005. Subduction-related metasomatism in the thinning lithosphere: Evidences from a compositesdunite-orthopyroxenite xenolith entrained in Mesozoic Laiwu high-Mg diorite, North China craton. *Geochimica, Geophysica, Geosystems (G3)*, 6(6): 1~20.
- Defant, M. J. , Drummond, M. S. , 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lith-

- osphere. *Nature*, 347:662—665.
- Frey, F. A., Prinz, M., 1978. Ultramafic inclusions from San Carlos, Arizona, petrologic and geochemical data bearing on their petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38:139—176.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *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. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., Mantle dynamics and plate interaction in East Asia. *American Geophysical Union, Geodynamics Series*, 27:107—126.
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8:523—548.
- Jahn, B. M., Auvray, B., Shen, Q. H., et al., 1988. Archean crustal evolution in China: The Taishan complex, and evidence for Juvenile crustal addition from long-term depleted mantle. *Precambrian Research*, 38:381—403.
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Lo, C. H., et al., 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, Central China. *Chem. Geol.*, 157:119—146.
- Luo, Z. K., Miao, L. C., 2002. Granites and gold deposits in Zhaoyuan-Laizhou area, eastern Shandong Province. Metallurgical Industry Press, Beijing, 20—57 (in Chinese).
- Menzies, M. A., Xu, Y., 1998. Geodynamics of the North China craton. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., Mantle dynamics and plate interaction in East Asia. *American Geophysical Union, Geodynamics Series*, 27(100):155—164.
- Pei, F. P., Xu, W. L., Wang, Q. H., 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. *Geological Journal of China Universities*, 10(1):88—97 (in Chinese with English abstract).
- Petford, N., Atherton, M. P., 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca batholith, Peru. *J. Petrol.*, 7:1491—1521.
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8—32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J. Petrol.*, 36:891—931.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins*. *Geol. Soc. Spel. Pub.*, 313—345.
- The Fourth Geological Research Institute, Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, 2003. Geological memoirs of Shandong Province. Shandong Mapping Press, Jinan (in Chinese).
- Wang, X. R., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2005. Geochemistry of high-Mg andesites from the Early Cretaceous Yixian Formation, western Liaoning: Implications for lower crustal delamination and Sr/Y variations. *Sci. in China (Ser. D)* (in press).
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. L., et al., 2005. Early Cretaceous giant igneous event in eastern China: Evidence from Liaodong Peninsula in NE China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1—2):103—119.
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in eastern China. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(4):313—318 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. F., Shinjo, S., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of East China: Partial melting of delaminated lower continental crust. *Geology*, 30:1111—1114.
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Gao, S., et al., 2003a. Discovery of dunite and pyroxenite xenoliths in Mesozoic diorite at Jinling, western Shandong and its significance. *Chinese Science Bulletin*, 48(15):1599—1603.
- 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. *Chinese Science Bulletin*, 47(14):1212—1216.
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Wang, Q. H., et al., 2003b. Petrology and geochemistry of two types of mantle-derived xenoliths in Mesozoic diorite from western Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4):623—636 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Wang, Q. H., et al., 2004a. Metasomatism of silica-rich melts (liquids) in dunite xenoliths from western Shandong, China: Implication for Mesozoic lithospheric mantle thinning. *Acta Geologica Sinica*, 78(1):72—80 (in Chinese with English abstract).

- Xu, W. L., Wang, D. Y., Wang, Q. H., 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. *Geochimica*, 33(3): 221—231 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Wang, S. M., 2000. PTtC model of Mesozoic and Cenozoic volcanism and lithospheric evolution. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(4): 329—335 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Zheng, C. Q., et al., 1999. The discovery of mantle- and crust-derived xenoliths in Mesozoic trachybasalts from western Liaoning, and their geological implication. *Geological Review*, 45(Suppl.): 444—449 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Liu, X. C., et al., 2004c. Chronology and sources of Mesozoic intrusive complex in Xu-Huai region, Central China: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 96—106.
- Xu, W. L., Yuan, C., Chi, X. G., et al., 1993. Mesozoic dioritic rocks and deep-seated inclusions in central North China platform. Geological Publishing House, Beijing, 164 (in Chinese).
- Xu, Y. G., Huang, X. L., Ma, J. L., et al., 2004. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China craton: Constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 147: 750—767.
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geosand. Newslett.*, 28: 353—370.
- 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. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144: 241—253.
- Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., et al., 2001. The characteristics and tectono-metallogenetic significance of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 236—244 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 罗振宽,苗来成,2002.胶东招莱地区花岗岩和金矿床.北京:冶金工业出版社,20—57.
- 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.高校地质学报,10(1): 88—97.
- 山东省地质矿产局第四地质研究院,2003.山东省区域地质志.济南:山东省地图出版社.
- 吴福元,孙德有,1999.中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄.长春科技大学学报,29(4): 313—318.
- 许文良,王冬艳,王清海,等,2003b.鲁西中生代闪长岩中两类幔源捕虏体的岩石学和地球化学.岩石学报,19(4): 623—636.
- 许文良,王冬艳,王清海,等,2004a.鲁西纯橄岩捕虏体中富硅质熔(流)体的交代作用:对中生代岩石圈地幔减薄的意义.地质学报,78(1): 72—80.
- 许文良,王冬艳,王清海,等,2004b.华北地块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.地球化学,33(3): 221—231.
- 许文良,王冬艳,王嗣敏,2000.中国东部中新生代火山作用的PTtC模型与岩石圈演化.长春科技大学学报,30(4): 329—335.
- 许文良,王冬艳,郑常青,等,1999.辽西阜新中生代粗面玄武岩中地幔和下地壳捕虏体的发现及其地质意义.地质论评,45(增刊): 444—449.
- 许文良,袁朝,迟效国,等,1993.华北地台中部中生代闪长质岩石及深源岩石包体.北京:地质出版社,1—164.
- 张旗,王焰,钱青,等,2001.中国东部燕山期Adakite的特征及其构造—成矿意义.岩石学报,17: 236—244.