

# 山东西部中生代青山群火山岩的地球化学特征及其岩石成因

张永清<sup>1)</sup>, 凌文黎<sup>2)</sup>, 张军波<sup>2)</sup>, 段瑞春<sup>3)</sup>, 任邦方<sup>1)</sup>, 杨红梅<sup>3)</sup>

1) 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津, 300170; 2) 中国地质大学地球科学学院, 武汉, 430074;  
3) 中国地质调查局武汉地质矿产研究所, 武汉, 430074

**内容提要:**以山东西部西董地区中生代青山群火山岩为研究对象, 在进行系统的元素—同位素分析的基础上, 探讨其岩浆源区和岩石成因, 同时丰富该区域岩石地层的地球化学特征。西董青山群火山岩  $\text{SiO}_2$  含量变化于 52.8%~59.8% 之间, 主要为钙碱性系列岩石, 岩石组合为玄武质粗面安山岩—玄武质安山岩—粗面安山岩,  $\text{MgO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  与  $\text{SiO}_2$  具有明显的负相关关系,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  与  $\text{SiO}_2$  具有正相关关系; 微量元素富集 Rb、Ba、Th、U 和 K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素, 稀土元素总量  $\Sigma\text{REE}$  变化范围为  $100 \times 10^{-6} \sim 187 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值范围为 8.2~11.1, 无明显的 Eu 异常 ( $\delta\text{Eu}=0.9 \sim 1.02$ ); 显示富集且均一的 Sr-Nd 同位素组成 ( $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.7047 \sim 0.7050$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-16.5 \sim -14.2$ )。西董青山群火山岩的 Nd、Sr 同位素组成与  $\text{SiO}_2$  缺乏明显负相关关系, Nb/Ta 与 La/Nb 之间不具有负相关关系以及 Nb 与 Th 之间具有正相关关系, 指示岩浆在上升和演化过程中地壳混染作用对青山群火山岩岩浆化学组成的影响并不显著; 火山岩  $\text{MgO}$  含量明显高于玄武岩部分熔融形成的熔体, 说明青山群中基性火山岩岩浆的形成过程可能与大陆地壳和地幔岩系之间的相互作用有关。综合分析表明, 西董中生代青山群火山岩是大陆下地壳物质经拆沉作用于地幔环境中发生部分熔融, 与上地幔岩石发生交代作用后进入地表形成。

**关键词:** 山东西部; 中生代; 青山群; 地球化学; 岩石成因

山东地区位于华北克拉通东南部, 自 20 世纪 80 年代开始就有关于新生代玄武岩含有大量岩石圈地幔包体的报道 (Fan Weiming et al., 2000; Zheng Jianping et al., 1998; Rudnick et al., 1995), 由于地幔包体代表了深部地幔的直接样品, 故该地区已成为研究华北克拉通新生代地幔组成、岩石学和地球化学特征及岩石圈厚度演化的重要地区之一。此外, 山东地区也是华北克拉通古生代地幔包体的出露地区: 在蒙阴古生代金伯利岩岩系中发现了大量的橄榄岩包体 (Chi Jishang et al., 1996), 因而为开展华北克拉通古生代至中—新生代地幔的演化提供了重要的研究样品和对比基础。中生代中—晚期是中国东部发生岩石圈减薄重要时期, 但在山东地区乃至整个华北中生代地幔包体的出露十分有限 (Yan Jun et al., 2003; Chen Lihui et al., 2005; Ying Jifeng et al., 2006), 因此要了解华北克拉通中生代岩石圈的演化, 加强与地幔物质有关的中生代

岩浆岩的研究显得十分必要。

伴随岩石圈减薄过程发生的大规模的岩浆作用, 是对岩石圈演化过程的直接记录。因此, 山东地区广泛出露的中生代岩浆岩为认识岩石圈减薄事件及其动力学过程提供了重要的物质基础 (Qiu Jiansheng et al., 1996, 2001, 2013; Li Haiyong et al., 2008; Ling Wenli et al., 2009; Wu Qi et al., 2013; Ren Tianlong et al., 2015; Li Hongkui et al., 2017)。山东西部作为山东地区重要的构造单元, 近年来已经作了大量的研究工作, 已有的研究表明, 这些岩石主要起源于富集地幔的部分熔融 (Qiu Jiansheng et al., 1996, 2001; Li Haiyong et al., 2008; Ling Wenli et al., 2009), 但目前对这类岩石的成因认识尚存在分歧, 特别是对源区地幔的富集机制存在不同观点 (表 1), Qiu Jiansheng et al. (1996, 2001) 认为来源于受俯冲地壳影响的富集型地幔的部分熔融; Li Haiyong et al. (2008) 和

注: 本文为国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目 (编号 40521001) 资助的成果。

收稿日期: 2016-07-11; 改回日期: 2016-09-22; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 张永清, 1982 年生, 女, 高级工程师, 硕士, 地球化学专业, 现从事同位素地球化学和地质年代学研究。Email: zhangyq823@163.com。

Ling Wenli et al. (2009)认为其成因与拆沉的下地壳和地幔物质交代作用有关。本文以山东西部西董地区中生代青山群火山岩为研究对象,采用同位素和多元素地球化学的研究方法,探讨岩浆的起源和岩石成因,同时丰富该区域岩石地层的地球化学特征。

表 1 山东西部地区中生代岩浆岩的形成时代及岩石成因  
Table 1 Chronology and petrogenesis of the mesozoic rocks in western Shandong

| 研究区及岩性                  | 年龄(Ma)                                | <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr 初始比值 | ε <sub>Nd</sub> ( <i>t</i> ) | 岩浆来源及岩石成因                          | 文献来源                       |
|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| 蒙阴橄榄安粗岩系火山岩             | 119.6±3.7                             | 0.71245                                 |                              | 与流体交代有关的富集地幔的部分熔融                  | Qiu Jiansheng et al., 1996 |
| 蒙阴富钾火山岩                 | 124.3~114.7                           |                                         | -11.47~-17.54                | 俯冲陆壳在地幔源区发生混染和交代作用时所形成的富集型地幔的部分熔融  | Qiu Jiansheng et al., 2001 |
| 蒙阴橄榄玄武岩,安山岩和英安岩         |                                       |                                         |                              | 与俯冲作用有关的富集地幔部分熔融的结果                | Liu Shen et al., 2003      |
| 济南镁铁质火成岩                |                                       | 0.70396~0.70598                         |                              | 与岩石圈大规模拆沉有关的富集地幔部分熔融               | Qiu Jiansheng et al., 2005 |
| 济南辉长岩                   | 130.8±1.5;<br>127±2                   |                                         |                              | 富集型地幔的部分熔融.                        | Yang Chenghai et al., 2005 |
| 高镁闪长岩                   | 131.4±4.9;<br>134.5±2.3;<br>132.8±4.2 | 0.70475~0.70772                         | -3.95~-13.3                  | 拆沉的岩石圈(地幔+下地壳)与软流圈混熔的产物            | Yang Chenghai et al., 2006 |
| 济南和邹平辉长岩                |                                       | 0.7041~0.7056                           | -6.0~-13.0                   | 富集地幔部分熔融的结果,可能与岩石圈拆沉有关             | Li Quanzhong et al., 2007  |
| 济南辉长-闪长岩                | 134±2;<br>129±1                       | 0.70962~0.71174                         | -16.60~-13.04                | 陆壳物质强烈改造的富集型地幔的部分熔融                | Yang Chenghai et al., 2008 |
| 蒙阴钾玄质系列火山岩              |                                       |                                         |                              | 与岩石圈大规模拆沉有关的富集地幔部分熔融               | Li Haiyong et al., 2008    |
| 蒙阴安山质火山岩                | 128±2                                 | 0.7093~0.7100<br>0.7084~0.7119          | -10.3~-13.8<br>-13.0~-16.5   | 与拆沉有关的富集地幔部分熔融的结果                  | Ling Wenli et al., 2009    |
| 济南辉长岩                   |                                       | 0.7050~0.7064                           | -8.1~-10.3                   | 受俯冲流体或熔体交代的富集岩石圈地幔。                | Gao Lin et al., 2013       |
| 章丘辉长闪长岩和辉长岩,泰安辉长岩和云母闪长岩 | 124~128                               | 0.7043~0.7063                           | -7.38~-19,除了一个为-1.77         | 富集岩石圈地幔的部分熔融,与富集型熔/流体交代上覆华北岩石圈地幔有关 | Ning Peisong et al., 2013  |
| 邹平玄武安山岩                 |                                       | 0.70567~0.70588                         | -10.0~-10.2                  | 富集型地幔的部分熔融.                        | Miao Baihu et al., 2015    |
| 淄川基性岩墙                  | 121.9~124.3                           | 0.7098                                  | -14.7~-14.5                  | 受俯冲扬子地壳沉积物交代后的富集岩石圈地幔部分熔融          | Liu Shen et al., 2016      |

## 1 地质背景

青山群火山岩在山东省分布广泛,岩性上由火山熔岩和火山碎屑沉积岩系组成。按岩性组合关系,青山群分为三个段,在出露完整的条件下,第一、第三岩性段为火山岩系,第二段为火山碎屑岩。但由于陆相火山岩的多变性和复杂性,在山东境内不同构造单元,青山群火山岩的岩性组成在横向上仍存在较大变化。东部地区以中、酸性岩为主,分布面积较大,一般呈面状分布;西部地区则以中、基性岩为主,规模较小,多呈带状分布;而地处东部、西部之间的鲁中地区,以发育中性、偏碱性火山岩为主,出露面积亦较小。

山东西部邹平一带,青山群发育普遍。山东省地矿局第五地质队自下而上将其划分为三个旋回,第一旋回为玄武安山岩、角砾熔岩夹凝灰岩;第二旋回为熔岩凝灰岩、角砾岩、粗斑玄武安山岩及粗安岩,第三旋回为集块岩、角砾岩、凝灰岩等火山碎屑岩,总厚度>4000m。邹平盆地的青山组地层中,极少或没有沉积夹层,喷溢活动强烈,且常伴有岩浆侵入,铜矿化作用明显。本文研究样品采集山东西部的章丘邹平西董大马峪剖面,具体采样位置如图所示(图 1),共采集 24 件样品。

## 2 样品分析

全岩样品在刚玉颚式破碎机中进行粗碎,然后

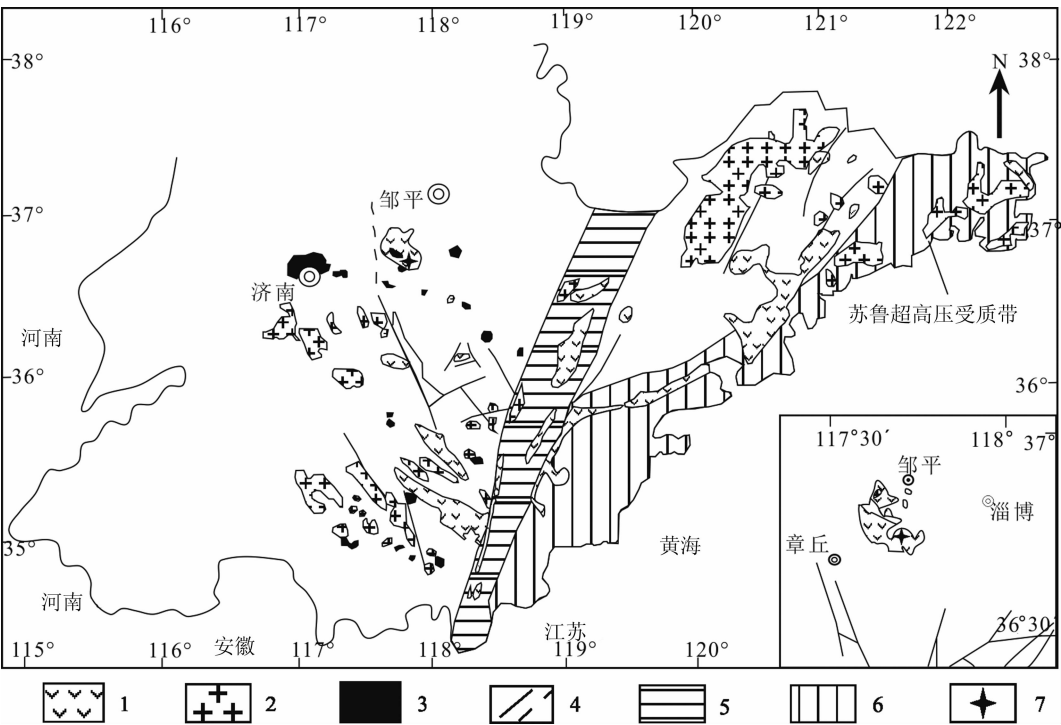


图 1 山东地区简要地质图(据 the Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, 1991 修改)  
Fig. 1 Simplified geological map of the Shandong area(after the Bureau of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, 1991)

1—中生代火山岩;2—中生代长英质侵入岩;3—中生代基性侵入岩;4—断裂与推测断裂;5—郯庐断裂带;6—苏鲁超高压变质带;7—采样剖面  
1—Mesozoic volcanic;2—Mesozoic felsic intrusive rocks;3—Mesozoic mafic intrusive rocks;4—fault and guess fault;  
5—Tanlu fault belt;6—Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt;7—Sampling section and sampling location

在 T1-100 型碳化钨钵体碎样机(日本 CMT Co. LTD)中最终碎至 200 目,保证了样品加工的无污染。在进行主量和微量元素、Sr-Nd 同位素分析之前,将粉末状岩石样品放入烘箱内 105℃ 烘干 2~3 小时,以除去样品的表面吸附水。

主量元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室采用 XRF(RIGAKU 2100 型)玻璃熔片法完成。测定时经 BCR-2 和 GBW07105 标样监控,并用 USGS 标准确定工作曲线。仪器检出限为  $10^{-6}$ ,元素的测定精度可达 0.01%,分析误差  $<5\%$ 。主量元素测量结果见表 2。

微量元素和同位素样品在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行分析和测试。微量元素样品分析流程用国际标样 BCR-2、AGV-1 和 GSS-1 监测,元素含量相对误差优于  $5\% \sim 10\%$ ,测量结果见表 3。

Sr、Nd 同位素样品测试,Sr 同位素质量分馏用  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.375209$  校正,国际标样 NBS987 和 NBS607 的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  测量结果分别为  $0.710300 \pm 4$  ( $2\sigma$ ,下同)和  $1.198898 \pm 4$ 。Nd 同位素质量分馏

用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721900$  校正,国际标样 La Jolla、BCR-2 的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  测试结果分别为  $0.511837 \pm 0.6$  和  $0.512619 \pm 2$ 。样品的 Sr-Nd 同位素组成测量结果列于表 4。

3 结果分析

3.1 主量元素

西董青山群火山岩  $\text{SiO}_2$  含量变化于  $52.8\% \sim 59.8\%$  之间,岩性主要为玄武质粗面安山岩,很少部分为玄武质安山岩和粗面安山岩(图 2);在 Hark 图解中(图 3), $\text{MgO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  与  $\text{SiO}_2$  具有明显的负相关关系,而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  与  $\text{SiO}_2$  具有正相关关系,指示出它们经历了同一岩浆结晶分异作用;在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解(图 4)上,样品主要落入高钾钙碱性系列,少部分在橄榄粗玄岩和钙碱性系列分布。

3.2 微量元素和稀土元素

西董青山群火山岩样品的  $\Sigma\text{REE}$  变化范围为  $100 \times 10^{-6} \sim 187 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  比值范围为 8.2~11.1,平均值为 9.7;在稀土元素的球粒陨石标准

表 2 西董青山群火山岩主量元素(%)组成

Table 2 Major element composition(%) of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area

| 样品号  | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | MgO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | LOI  | Total  | Mg # | A/CNK |
|------|------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|--------|------|-------|
| XD01 | 56.42            | 0.85             | 15.78                          | 8.36                            | 0.12 | 4.11 | 6.47 | 3.15              | 2.80             | 0.41                          | 1.55 | 100.02 | 49.3 | 0.790 |
| XD02 | 56.48            | 0.85             | 16.06                          | 8.37                            | 0.11 | 3.98 | 6.14 | 3.23              | 3.21             | 0.41                          | 1.47 | 100.31 | 48.5 | 0.805 |
| XD03 | 55.52            | 0.83             | 15.99                          | 8.61                            | 0.13 | 4.04 | 5.88 | 3.24              | 3.29             | 0.39                          | 1.76 | 99.68  | 48.1 | 0.817 |
| XD04 | 56.15            | 0.86             | 15.99                          | 8.84                            | 0.13 | 3.92 | 5.16 | 4.76              | 1.98             | 0.40                          | 2.13 | 100.32 | 46.7 | 0.826 |
| XD05 | 53.21            | 0.89             | 14.99                          | 10.08                           | 0.13 | 4.63 | 5.89 | 4.03              | 2.49             | 0.37                          | 2.93 | 99.64  | 47.6 | 0.748 |
| XD06 | 56.34            | 0.85             | 15.78                          | 8.49                            | 0.12 | 4.45 | 4.23 | 3.60              | 3.59             | 0.40                          | 2.06 | 99.91  | 50.9 | 0.902 |
| XD07 | 55.73            | 0.91             | 16.11                          | 9.78                            | 0.11 | 4.28 | 3.93 | 4.66              | 1.33             | 0.43                          | 2.91 | 100.18 | 46.4 | 0.991 |
| XD08 | 55.58            | 0.82             | 16.04                          | 8.68                            | 0.14 | 4.10 | 4.68 | 3.78              | 3.68             | 0.40                          | 1.83 | 99.73  | 48.3 | 0.857 |
| XD10 | 53.92            | 0.84             | 15.28                          | 9.33                            | 0.12 | 3.44 | 6.27 | 4.41              | 1.11             | 0.38                          | 4.66 | 99.76  | 42.1 | 0.769 |
| XD11 | 59.79            | 0.76             | 15.84                          | 8.21                            | 0.10 | 2.11 | 4.96 | 4.73              | 1.85             | 0.31                          | 0.91 | 99.57  | 33.7 | 0.842 |
| XD12 | 55.67            | 0.86             | 15.87                          | 9.18                            | 0.13 | 3.94 | 5.46 | 5.25              | 1.76             | 0.40                          | 1.66 | 100.18 | 45.9 | 0.775 |
| XD13 | 55.00            | 0.85             | 15.39                          | 9.51                            | 0.14 | 4.43 | 6.35 | 3.82              | 2.32             | 0.39                          | 1.69 | 99.89  | 48.0 | 0.757 |
| XD14 | 55.19            | 0.84             | 16.41                          | 9.19                            | 0.12 | 4.04 | 6.90 | 2.99              | 2.64             | 0.38                          | 1.51 | 100.21 | 46.5 | 0.807 |
| XD15 | 54.64            | 0.81             | 14.59                          | 9.04                            | 0.13 | 6.17 | 6.13 | 3.41              | 2.90             | 0.39                          | 1.99 | 100.20 | 57.5 | 0.733 |
| XD16 | 54.46            | 0.78             | 14.36                          | 8.75                            | 0.12 | 5.94 | 6.92 | 2.73              | 3.47             | 0.37                          | 1.86 | 99.76  | 57.3 | 0.689 |
| XD17 | 54.67            | 0.80             | 15.79                          | 8.71                            | 0.12 | 4.29 | 6.38 | 4.10              | 2.57             | 0.41                          | 1.80 | 99.64  | 49.4 | 0.747 |
| XD18 | 55.29            | 0.80             | 14.83                          | 9.38                            | 0.12 | 5.41 | 5.43 | 5.35              | 1.66             | 0.41                          | 1.70 | 100.38 | 53.3 | 0.724 |
| XD19 | 54.66            | 0.80             | 15.16                          | 9.05                            | 0.13 | 5.29 | 7.68 | 2.97              | 2.22             | 0.39                          | 1.21 | 99.56  | 53.6 | 0.713 |
| XD20 | 55.27            | 0.88             | 14.69                          | 9.48                            | 0.12 | 5.20 | 5.70 | 5.21              | 1.79             | 0.43                          | 1.66 | 100.43 | 52.0 | 0.704 |
| XD21 | 53.58            | 0.79             | 13.97                          | 10.09                           | 0.17 | 6.27 | 7.49 | 2.79              | 2.31             | 0.36                          | 1.97 | 99.79  | 55.1 | 0.675 |
| XD22 | 53.83            | 0.81             | 14.25                          | 10.21                           | 0.15 | 6.10 | 7.26 | 3.25              | 2.21             | 0.37                          | 2.02 | 100.46 | 54.2 | 0.681 |
| XD23 | 54.97            | 0.78             | 14.61                          | 9.28                            | 0.13 | 5.06 | 6.58 | 3.23              | 2.05             | 0.39                          | 2.45 | 99.53  | 51.9 | 0.749 |
| XD24 | 52.80            | 0.89             | 14.48                          | 10.36                           | 0.15 | 6.01 | 7.15 | 3.11              | 2.56             | 0.46                          | 2.35 | 100.32 | 53.4 | 0.693 |
| XD25 | 57.41            | 0.78             | 14.65                          | 8.39                            | 0.11 | 4.57 | 5.09 | 4.54              | 2.46             | 0.40                          | 1.63 | 100.03 | 51.8 | 0.756 |

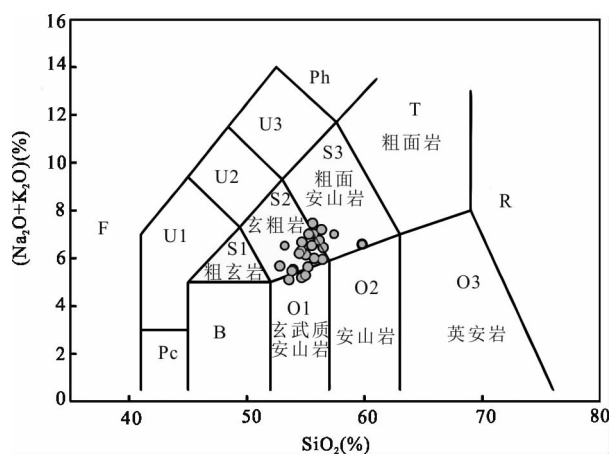


图 2 西董青山群火山岩 TAS 图解(据 Middlemost,1994)  
Fig.2 Total alkali-silica (TAS) plot of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area (after Middlemost, 1994)

化配分模式图(图 5a)上,青山群火山岩均表现出一致的右倾型分布模式,即 LREE 相对 HREE 富集,无明显的 Eu 异常( $\delta\text{Eu}=0.9\sim1.02$ ),表明岩浆结晶时没有经历明显的斜长石分离结晶作用。西董地区火山岩具有一致的原始地幔标准化蛛网图(图 5b),均显示出大离子亲石元素(LILE)相对富集和高场强元素(HFSE)亏损的总体一致特征,明显富

集的 LILE 包括 Rb、Ba、Th、U、和 K,明显亏损的 HFSE 为 Nb、Ta 和 Ti,存在显著的 Pb 正异常,显示出与典型的岛弧火山岩类似的特征。

### 3.3 Sr-Nd 同位素

对西董青山群 12 个火山岩样品进行了 Sr-Nd 同位素测试,根据前人的年代学研究结果统计(表 1),山东西部地区火山岩样品年龄集中的 130Ma 左右,因此所有样品的初始同位素比值均按 130 Ma 进行计算。西董火山岩的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为  $0.7047\sim0.7050$ 、初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值范围  $0.511627\sim0.511745$ ,相应的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为  $-16.5\sim-14.2$ ,Sr-Nd 同位素比值变化很小,暗示了岩浆源区组分的均一性。在( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) $_{t-\epsilon_{\text{Nd}}(t)}$ 关系图(图 6)上位于地幔端元 EMI 附近。

## 4 讨论

### 4.1 地壳混染

西董青山群火山岩产于大陆地区,与大洋地区相比,大陆内部喷发的岩浆在向地表运移过程中,经历较厚的地壳,可能会受到地壳物质不同程度的混染而具有更为复杂的地球化学特征。因此,对岩石源区性质和成因的研究,需要对原始岩浆在地壳的

表 3 西董青山群火山岩微量元素( $\times 10^{-6}$ )组成

Table 3 Trace element composition ( $\times 10^{-6}$ ) of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area

| 样品号 | XD01 | XD03 | XD06 | XD11 | XD12 | XD17 | XD18 | XD20 | XD21 | XD22 | XD23 | XD25 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Be  | 1.87 | 1.22 | 1.22 | 0.72 | 1.29 | 1.15 | 1.00 | 1.13 | 1.55 | 1.29 | 1.12 | 1.80 |
| Cr  | 98.1 | 49.0 | 39.4 | 44.9 | 42.5 | 85.3 | 164  | 195  | 141  | 100  | 79.8 | 151  |
| Co  | 56.5 | 37.4 | 30.8 | 39.1 | 31.8 | 39.7 | 39.7 | 40.1 | 70.1 | 67.0 | 42.8 | 40.3 |
| Ni  | 35.6 | 19.7 | 17.0 | 13.1 | 16.9 | 28.7 | 43.4 | 76.7 | 40.7 | 28.5 | 25.4 | 53.9 |
| Ga  | 29.4 | 20.3 | 19.8 | 21.0 | 21.6 | 18.9 | 16.4 | 14.9 | 25.9 | 18.7 | 18.3 | 18.7 |
| Rb  | 107  | 69.8 | 88.6 | 36.6 | 38.8 | 65.6 | 37.1 | 43.3 | 79.1 | 57.0 | 52.8 | 69.8 |
| Sr  | 1026 | 718  | 696  | 707  | 720  | 808  | 503  | 506  | 1010 | 791  | 762  | 833  |
| Y   | 25.2 | 17.8 | 17.4 | 14.5 | 18.6 | 16.3 | 17.3 | 17.8 | 23.5 | 17.0 | 16.9 | 20.7 |
| Zr  | 203  | 121  | 117  | 98.0 | 118  | 88.7 | 94.1 | 103  | 142  | 101  | 103  | 142  |
| Nb  | 10.2 | 6.10 | 5.77 | 4.54 | 5.81 | 4.62 | 4.93 | 5.45 | 6.89 | 5.03 | 4.68 | 7.08 |
| Cs  | 1.59 | 1.60 | 1.54 | 0.33 | 0.53 | 0.84 | 0.45 | 0.54 | 4.89 | 2.82 | 2.53 | 1.11 |
| Ba  | 1390 | 1104 | 1126 | 682  | 785  | 1351 | 692  | 607  | 1328 | 902  | 867  | 1196 |
| La  | 35.1 | 22.8 | 22.0 | 18.5 | 21.7 | 17.7 | 19.2 | 18.0 | 28.4 | 19.9 | 20.6 | 28.2 |
| Ce  | 77.2 | 50.5 | 50.5 | 40.1 | 51.1 | 40.7 | 42.5 | 44.9 | 63.7 | 44.4 | 47.6 | 63.2 |
| Pr  | 8.99 | 6.03 | 5.86 | 4.88 | 5.89 | 4.94 | 5.10 | 5.27 | 7.61 | 5.34 | 5.53 | 7.39 |
| Nd  | 39.0 | 25.8 | 24.9 | 21.1 | 25.2 | 21.7 | 22.5 | 23.1 | 33.0 | 23.2 | 23.8 | 31.7 |
| Sm  | 7.34 | 4.99 | 5.03 | 4.16 | 5.18 | 4.44 | 4.66 | 4.78 | 6.94 | 4.89 | 4.68 | 6.38 |
| Eu  | 2.00 | 1.42 | 1.40 | 1.16 | 1.45 | 1.36 | 1.34 | 1.36 | 1.99 | 1.39 | 1.30 | 1.66 |
| Gd  | 5.60 | 3.89 | 3.72 | 3.20 | 3.82 | 3.47 | 3.50 | 3.83 | 5.28 | 3.83 | 3.58 | 4.47 |
| Tb  | 0.78 | 0.56 | 0.53 | 0.46 | 0.56 | 0.50 | 0.50 | 0.55 | 0.76 | 0.55 | 0.51 | 0.65 |
| Dy  | 4.84 | 3.32 | 3.22 | 2.79 | 3.40 | 2.93 | 3.15 | 3.33 | 4.63 | 3.24 | 3.05 | 3.83 |
| Ho  | 0.87 | 0.63 | 0.61 | 0.53 | 0.62 | 0.55 | 0.60 | 0.64 | 0.88 | 0.60 | 0.57 | 0.72 |
| Er  | 2.31 | 1.64 | 1.56 | 1.34 | 1.61 | 1.47 | 1.49 | 1.67 | 2.15 | 1.55 | 1.50 | 1.82 |
| Tm  | 0.33 | 0.22 | 0.23 | 0.20 | 0.22 | 0.20 | 0.20 | 0.22 | 0.31 | 0.21 | 0.21 | 0.24 |
| Yb  | 2.26 | 1.54 | 1.47 | 1.32 | 1.55 | 1.49 | 1.51 | 1.58 | 2.23 | 1.55 | 1.51 | 1.85 |
| Lu  | 0.29 | 0.20 | 0.21 | 0.18 | 0.21 | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 0.30 | 0.21 | 0.20 | 0.25 |
| Hf  | 4.42 | 2.77 | 2.67 | 2.31 | 2.63 | 2.06 | 2.23 | 2.46 | 3.39 | 2.39 | 2.33 | 3.15 |
| Ta  | 0.50 | 0.31 | 0.26 | 0.23 | 0.26 | 0.23 | 0.23 | 0.25 | 0.33 | 0.25 | 0.21 | 0.32 |
| Pb  | 13.2 | 11.2 | 10.8 | 12.9 | 11.6 | 11.3 | 5.73 | 5.87 | 15.5 | 14.4 | 11.4 | 19.7 |
| Th  | 3.59 | 2.13 | 2.11 | 1.58 | 1.80 | 1.75 | 1.84 | 1.92 | 2.62 | 1.86 | 1.78 | 2.69 |
| U   | 1.15 | 0.64 | 0.71 | 0.60 | 0.61 | 0.55 | 0.57 | 0.63 | 0.89 | 0.62 | 0.58 | 0.89 |

表 4 西董青山群火山岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Sr-Nd isotopic composition of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area

| 样号   | $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | $2\sigma$ | $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | $2\sigma$ | $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$ | $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ | $t_{2\text{DM}}(\text{Ga})$ |
|------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| XD01 | 0.301                           | 0.705393                        | $\pm 2$   | 0.704837                            | 0.1137                            | 0.511807                          | $\pm 3$   | 0.511710                              | -14.84                    | 1.88                        |
| XD03 | 0.281                           | 0.705532                        | $\pm 2$   | 0.705012                            | 0.1167                            | 0.511766                          | $\pm 1$   | 0.511667                              | -15.69                    | 1.95                        |
| XD06 | 0.368                           | 0.705615                        | $\pm 2$   | 0.704935                            | 0.1223                            | 0.511787                          | $\pm 1$   | 0.511683                              | -15.37                    | 1.95                        |
| XD11 | 0.150                           | 0.705113                        | $\pm 2$   | 0.704836                            | 0.1194                            | 0.511777                          | $\pm 2$   | 0.511675                              | -15.52                    | 1.95                        |
| XD12 | 0.156                           | 0.705051                        | $\pm 3$   | 0.704763                            | 0.1241                            | 0.511763                          | $\pm 1$   | 0.511657                              | -15.87                    | 1.99                        |
| XD17 | 0.235                           | 0.705213                        | $\pm 2$   | 0.704780                            | 0.1238                            | 0.511850                          | $\pm 1$   | 0.511745                              | -14.17                    | 1.88                        |
| XD18 | 0.214                           | 0.705097                        | $\pm 4$   | 0.704702                            | 0.1250                            | 0.511836                          | $\pm 1$   | 0.511730                              | -14.46                    | 1.90                        |
| XD20 | 0.247                           | 0.705131                        | $\pm 3$   | 0.704674                            | 0.1249                            | 0.511832                          | $\pm 1$   | 0.511726                              | -14.54                    | 1.91                        |
| XD21 | 0.227                           | 0.705126                        | $\pm 4$   | 0.704707                            | 0.1272                            | 0.511791                          | $\pm 1$   | 0.511683                              | -15.37                    | 1.97                        |
| XD22 | 0.208                           | 0.705098                        | $\pm 3$   | 0.704713                            | 0.1270                            | 0.511786                          | $\pm 1$   | 0.511678                              | -15.47                    | 1.98                        |
| XD23 | 0.201                           | 0.705214                        | $\pm 3$   | 0.704844                            | 0.1189                            | 0.511728                          | $\pm 2$   | 0.511627                              | -16.47                    | 2.01                        |
| XD25 | 0.242                           | 0.705320                        | $\pm 2$   | 0.704872                            | 0.1217                            | 0.511769                          | $\pm 1$   | 0.511666                              | -15.71                    | 1.97                        |

注： $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值由 Rb、Sr、Sm、Nd 的 ICP-MS 含量计算获得； $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  的计算参数采用  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$ 、 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$ ，其中  $t = 130\text{Ma}$ 。

运移过程是否受到过地壳物质的混染进行判别。

由于岩浆作用过程中,若无地壳物质的混染,岩浆的同位素比值(组成)将不受部分熔融程度和结晶分异作用的影响,因此岩浆应与其源岩物质具有相同的同位素比值。若岩浆迁移和演化的过程中受到了地壳围岩物质的加入,则其同位素比值将随受地

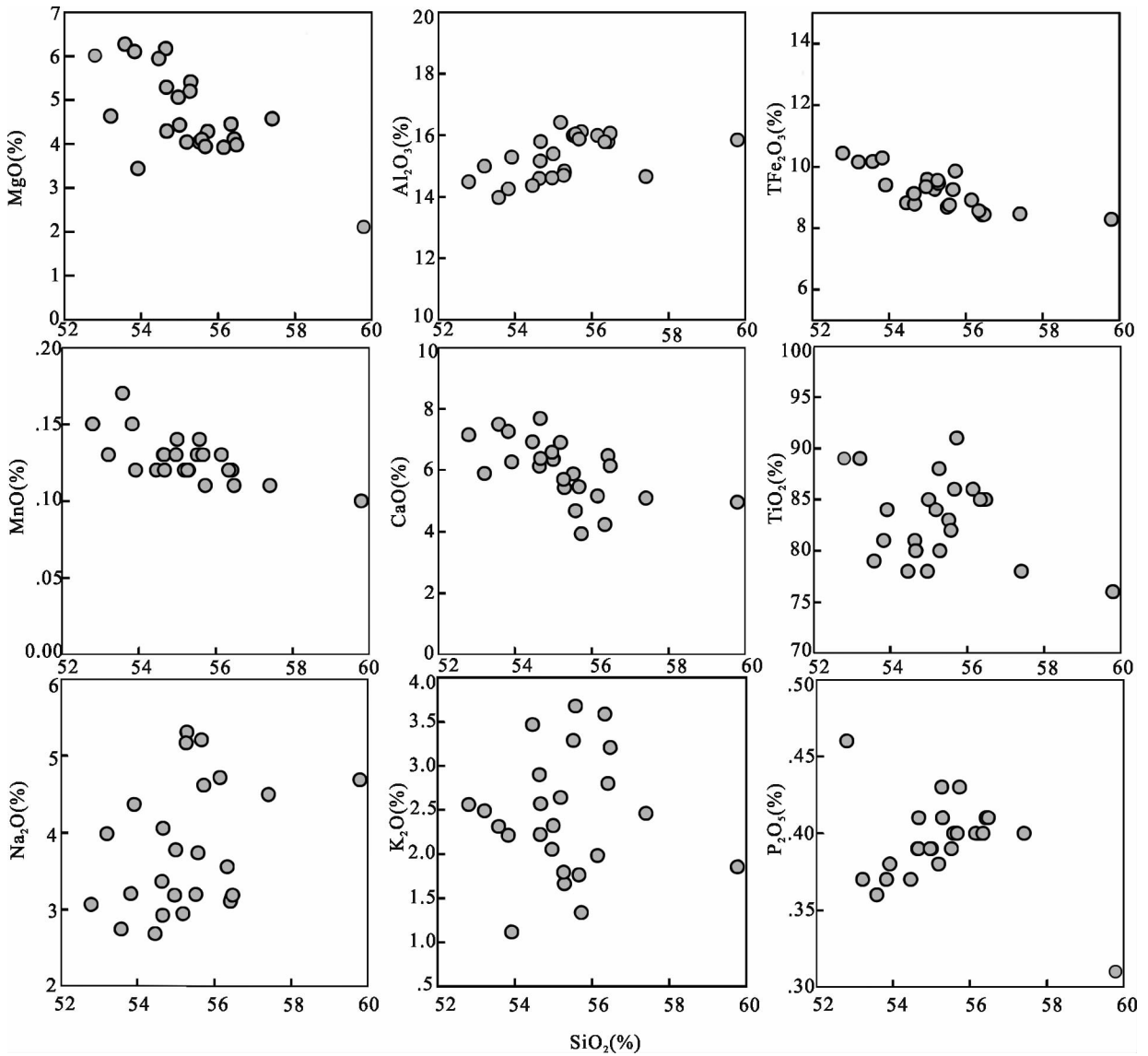


图3 西董青山群火山岩 Hark 图解

Fig. 3 Harker plots of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area

壳混染的程度而发生相应的改变,与地壳富集元素,如 Rb、Sr、Nd、K、Th、SiO<sub>2</sub> 等形成一定的相关关系。

由图可见,西董青山群火山岩的 Nd、Sr 同位素组成与 SiO<sub>2</sub> 缺乏明显负(图 7a)或正相关(图 7b),说明地壳混染作用对青山群火山岩同位素组成的影响并不显著。

同时上地壳以富集 Th 为特征,而在原始地幔标准化图解上这些火山岩的 Th 相对于 Ba 具有的负异常说明(图 5b),上地壳混染对于岩浆化学组成的影响有限(Taylor et al., 1985);Nb/Ta 与 La/Nb 之间不具有负相关关系(图 7c)以及 Nb 与 Th 之间具有正相关关系(图 7d),指示岩浆在上升和演化过程中地壳混染作用对青山群火山岩岩浆化学组成的影响并不显著(Rudnick et al., 1995; Münker,

1998)。

#### 4.2 岩浆源区及岩石成因

对于中基性火山岩,其可能的源区主要有两种:上地幔发生部分熔融或下地壳基性岩石重熔。西董青山群火山岩富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素,高初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值、负的 ε<sub>Nd</sub> 值,这些特征表明西董青山群火山岩具有明显的壳源的地球化学性质,可能的源区组成包括被交代过的富集地幔或下地壳古基性岩类。

岩石学实验显示,玄武岩或变玄武岩在 0.8~3.2GPa 压力下部分熔融可形成具高钾钙碱性特征的中酸性熔体(Rapp et al., 1995, 1999),但熔体 MgO、Cr、Ni 含量及 Mg<sup>#</sup> 普遍较低(<45);如果源区中存在地幔橄榄岩,熔体 Mg<sup>#</sup>、MgO 含量会明显

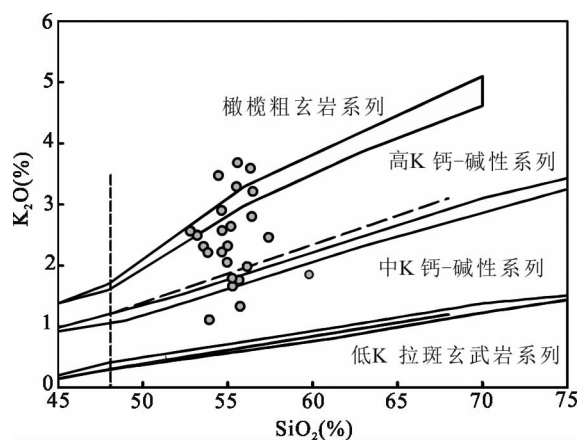


图 4 西董青山群火山岩 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 关系  
图解(据 Le Maitre et al. ,1989)

Fig. 4 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O plot of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area (after Le Maitre et al. ,1989)

增加(Rapp et al. ,1999)。西董火山岩(除了一个样品点)其 MgO 含量明显高于玄武岩部分熔融形成的熔体(图 8),这一特征说明,若西董青山群火山岩来源于下地壳基性岩的重熔作用,则其化学组成中的 MgO 显得相对过剩,由于整个山东地区青山群火山岩均明显缺乏典型的玄武质岩石,这一现象难以用单纯的地幔岩石部分熔融作用来解释。因此,青山群中基性火山岩其岩浆的形成过程可能与大陆地壳和地幔岩系之间的相互作用有关。图 9 中 A/CNK[(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)分子比]表现出随着 Mg<sup>#</sup> 的增加而下降的趋势,也是下地壳与地幔岩石发生交代作用的一个指示(Rapp et al. ,1995, 1999)。

大陆地壳与上地幔间的相互作用可经由不同的

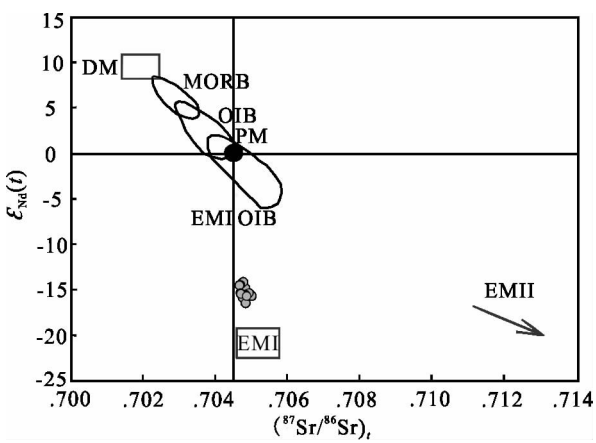


图 6 西董青山群火山岩 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub>-ε<sub>Nd</sub>(t)  
图解(据 Zindler, 1986)

Fig. 6 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub>-ε<sub>Nd</sub>(t) plot of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area (after Zindler, 1986)

途径发生,其中较典型的方式包括:大陆下地壳物质经拆沉作用于地幔环境中发生部分熔融作用,与上地幔岩石发生交代作用后进入地表形成火山岩系(Li Shuguang et al. ,2002;Gao Shan et al. ,2004;Liu shen et al. ,2003;LingWenli et al. ,2009;Zhou Qunjun et al. ,2013);早期亏损的岩石圈地幔受到后期流体的交代作用,所形成的富集地幔发生部分熔融后,形成中基性火山岩(Zhang Hongfu et al. , 2002;Xu Yigang et al. ,2004; Zhou Xinhua et al. , 2005;Yang Debin et al. ,2012)。

虽然陆缘岛弧火山岩的地球化学性质与青山群火山岩十分相似(Gill,1981),但研究区位于华北克拉通内部,远离周缘的造山带,晚中生代以来属于典型的大陆板内环境,排除了其成因与板块俯冲作用

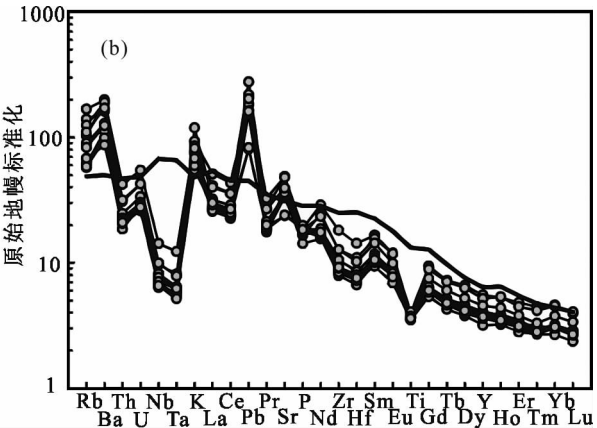
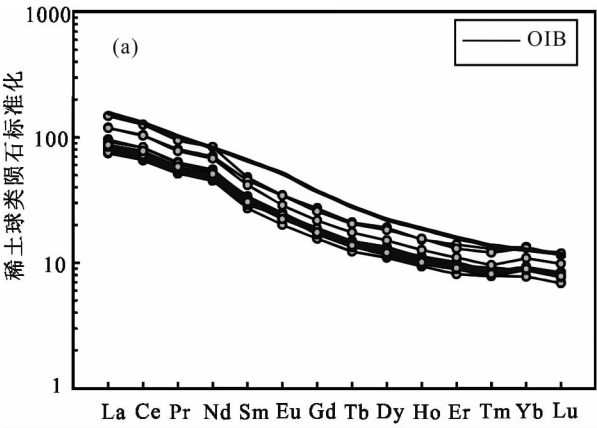


图 5 西董青山群火山岩稀土元素球粒陨石标准化和微量元素原始地幔标准化图解(标准化数据据 Sun et al. ,1989)  
Fig. 5 Chondrite normalized REE and primitive mantle normalized multi-element diagrams of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area (normalization values from Sun et al. ,1989)

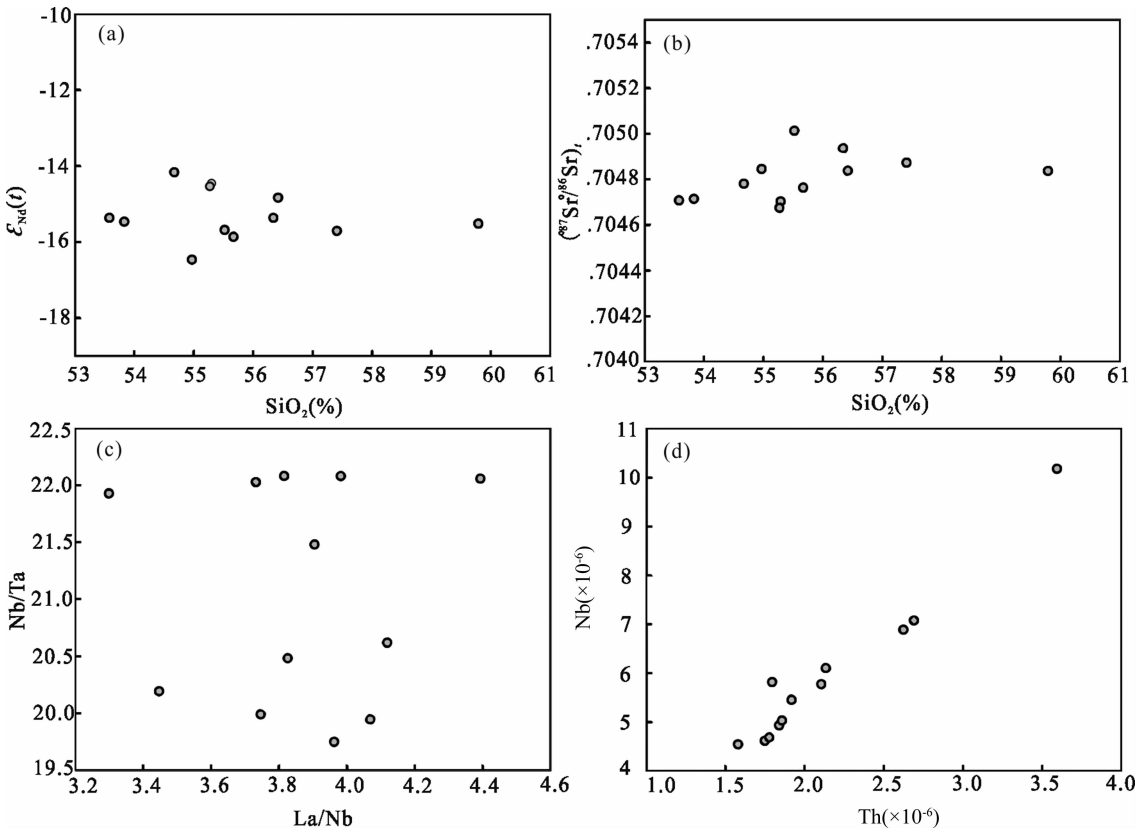


图 7 西董青山群火山岩的  $\text{SiO}_2$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ,  $\text{SiO}_2$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ ,  $\text{La}/\text{Nb}$ - $\text{Nb}/\text{Ta}$  和  $\text{Th}$ - $\text{Nb}$  关系图解  
Fig. 7  $\text{SiO}_2$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ,  $\text{SiO}_2$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ ,  $\text{La}/\text{Nb}$ - $\text{Nb}/\text{Ta}$  和  $\text{Th}$ - $\text{Nb}$  plots of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area

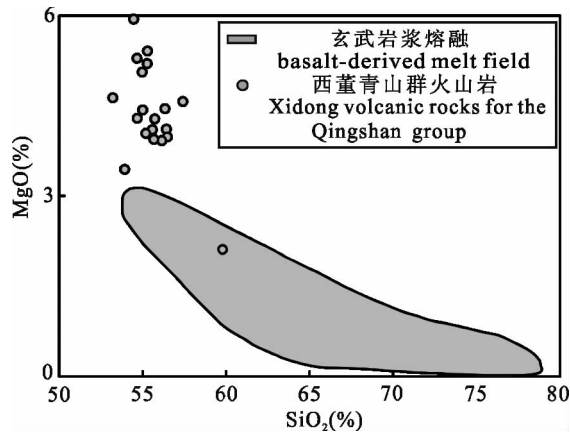


图 8 西董青山群火山岩  $\text{SiO}_2$ - $\text{MgO}$  图解  
(玄武岩熔体区域据 Rapp et al., 1995)  
Fig. 8  $\text{SiO}_2$ - $\text{MgO}$  plot of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area (basalt-derived melt field from Rapp et al., 1995)

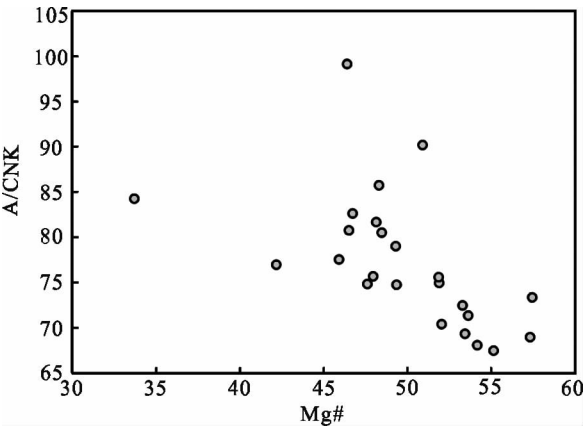


图 9 西董青山群火山岩  $\text{Mg}^\#$ - $\text{A}/\text{CNK}$  关系图解  
Fig. 9  $\text{Mg}^\#$ - $\text{A}/\text{CNK}$  plot of the volcanic rocks for the Qingshan group in Xidong area

之间的联系(Guo Feng et al., 2001),西董青山群火山岩的地球化学特征并不符合类似于俯冲环境条件下壳源物质对地幔楔交代后形成的岩浆岩性质。因此,影响青山群火山岩的源岩具富集端元地球化学

特征的主要因素应不是富水流体与地幔岩石交代作用,而应主要来自于大陆下地壳物质经拆沉作用于地幔环境中发生部分熔融与上地幔岩石间交代作用的结果。近年来,对邹平盆地中生代火山岩(Li Haiyong et al., 2008),以及对蒙阴盆地的高镁及低镁安山质火山岩(Ling Wenli et al., 2009)研究均表



明,其火山岩源于拆沉的大陆地壳物质部分熔融形成的熔体与地幔岩石间交代作用的结果。

西董青山群火山岩二阶段 Nd 模式年龄为 1.88~2.01Ga,这些年龄信息与华北克拉通陆壳演化的时间较吻合,而与扬子克拉通陆壳增生期主要为新元古(~0.7Ga)的年龄明显不同,也指示源区组成中存在因拆沉而进入地幔的华北克拉通的古老地壳物质。

为对西董中生代青山群火山岩原始岩浆的形成与下地壳熔体及其与上地幔交代之间的关系提出进一步的地球化学约束,图 10 将华北和扬子陆块下地壳及华北克拉通古生代岩石圈地幔平均组成作为物质端元,在 Sr-Nd 同位素图解上,对下地壳岩石发生部分熔融后形成的熔体与华北克拉通岩石圈地幔发生交代作用进行了计算拟合。结果表明,西董中生代青山群火山岩岩浆约 75%来自下地壳物质重熔、约 25%来自交代的岩石圈地幔;西董青山群火

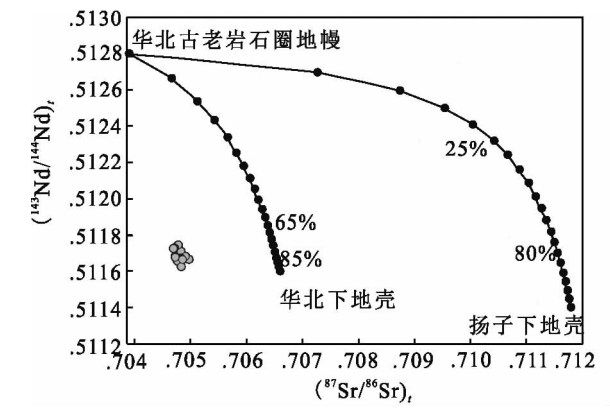


图 10 华北和扬子下地壳与古老岩石圈地幔同位素混合图解(数据均校正到 130Ma。华北古老岩石圈地幔数据来源(Zheng Jianping et al.,1999);  $Sr=20.4\times10^{-6}$ ,  $Nd=9.6\times10^{-6}$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr=0.7039$ ,  $^{143}Nd/^{144}Nd=0.5128$ ;华北下地壳数据来源(Liu Yongsheng et al.,2004); $Sr=155\times10^{-6}$ ,  $Nd=24\times10^{-6}$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr=0.7066$ ,  $^{143}Nd/^{144}Nd=0.5116$ ;扬子下地壳数据来源(Gao Shan et al.,1999); $Sr=290\times10^{-6}$ ,  $Nd=15\times10^{-6}$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr=0.7118$ ,  $^{143}Nd/^{144}Nd=0.5114$ ;西董地区青山群火山岩约 75%来自下地壳物质重熔、约 25%来自交代的岩石圈地幔)

Fig. 10 The isotopic mixed graphic of the North China and the Yangtze crust with the ancient lithospheric mantle the ancient lithospheric mantle from Zheng Jianping et al., 1999; the North China crust from Liu Yongsheng et al., 2004; the Yangtze crust from Gao Shan et al., 1999; The Qingshan group volcanic rocks about 75% from the lower crust remelting, about 25% from the metasomatic lithosphere mantle)

山岩显示靠近华北下地壳,远离扬子下地壳,同样说明华北克拉通的古老地壳物质对岩浆源区的贡献。

## 5 结论

(1)西董青山群火山岩  $SiO_2$  含量变化于 52.8%~59.8%之间,主要为钙碱性系列岩石,岩性主要为安山岩,岩石组合为玄武质粗面安山岩—玄武质安山岩—粗面安山岩。

(2)西董青山群火山岩在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上均表现出一致的右倾型分布模式,无明显的 Eu 异常;样品均显示出大离子亲石元素(LILE)相对富集和高场强元素(HFSE)亏损的一致特征; $Sr-Nd$  同位素特征显示高初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值(0.7047~0.7050)、负的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-16.5~-14.2), $Sr-Nd$  同位素比值变化很小,暗示了岩浆源区组分的均一性。

(3)西董青山群火山岩为大陆下地壳物质经拆沉作用于地幔环境中发生部分熔融作用,与上地幔岩石发生交代作用后进入地表形成。

## References

Chi Jishang, Lu Fengxiang. 1996. Kimberlite and paleozoic lithospheric mantle of North China platform. Beijing:Sci press( in Chinese with English abstract).

Chen Lihui, Zhou Xinhua. 2005. Subduction-related metasomatism in the thinning lithosphere: Evidence from a composite dunite-orthopyroxenite xenolith entrained in Mesozoic Laiwu high-Mg diorite, North China Craton. *G3*, 6(6): 1~20.

Fan Weiming, Zhang Hongfu, Baker J, Jarvis K E, Mason P R D, Menzies M A. 2000. On and off the North China Craton : where is the Archean keel ? *J Petrology*, 41: 933~950.

Gill J B. 1981. Orogenic andesites and plate tectonics. Berlin: Springer-Verlag.

Geology and Mineral Resources Bureau of Shandong Province. Shandong Province Regional Geology 1991. Beijing: Geological Publishing House ( in Chinese with English abstract).

Gao Shan, Ling Wenli, Qiu Yumin, Zhou Lian, Gerald H, Klaus S. 1999. Contrasting geochemical and Sr-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,63:2071~208.

Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun. 2001. Later Mesozoic intrusive complexes in North China Block: Constraints on the nature of subcontinental lithospheric mantle. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26 (9-10): 759~771.

Gao Shan, Rudnick R L, Yuan Honglin, Liu Xiaoming, Liu Yongsheng, Xu Wenliang, Ling Wenli, Ayers J, Wang

- Qinghai. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. *Nature*, 432: 892~897.
- Gao Lin, Chen Bin. 2013. Study on petrology, geochemistry and Os-Nd-Sr isotopes of Jinan gabbro in Luxi block. *Journal of earth sciences and environment*, 35(2): 19~31 (in Chinese with English abstract).
- Le Maitre R W. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Oxford: Blackwell.
- Lu Songnian, Yang Chunliang, Jiang Mmingmei, Li Huaikun, Li Huimin. 1996. Tracing constrains on the evolution of Precambrian continental crust. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang, Huang Fang, Li Hui. 2002. Post-collision delamination of the lithosphere beneath Dabie Sulu orogenic belt. *Chinese Science Bulletin*, 46: 1487~1490.
- Liu Shen, Hu Ruizhong, Zhao Junhong, Feng Caixia. 2003. Tectonic setting and petrogenesis of Qingshan Formation volcanic rocks in western Shandong Province: evidence from major elements and trace elements. *Geochimica*, 32(4): 306~316 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Yuan Honglin, Zhou Lian, Liu Xiaoming, Wang Xuance, Hu Zhaochu. 2004. U-Pb zircon ages and Nd, Sr, and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton: insights on evolution of lower continental crust. *Chemical Geology*, 211: 87~109.
- Li Quanzhong, Xie Zhi, Chen Jiangfeng, Gao Tianshan, Yu Gang, Qian Hui. 2007. Pb-Sr-Nd isotopic characteristics of the Gabbros from Jinan and Zouping and the contribution of the lower crust to the magma source. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 297~310 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shen, Hu Ruizhong, Gao Shan, Feng Caixia, Qi Yongqiang, Wang Tao, Feng Guangying, Couison I M. 2008. U-Pb zircon age, geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on age and origin of alkaline intrusions and associated mafic dikes from Sulu orogenic belt. *Lithos*, 103: 365~379.
- Li Haiyong, Xu Zhaowen, Lu Xiancai, Chen Lihui, Liu Suming, Yang Xiaonan, Zhang Jun, Li Hongchao, Chen Wei. 2008. Evolution of mesozoic volcanic rocks in the Zouping basin, western Shandong province: constraints for mantle sources. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2537~2547 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongkui, Li Dapeng, Ceng Ke, Guo Baokui, Zhuo Chuanyuan, Liang Taitao. 2017. The Mesozoic magmatic activities framework in Jiaodong area: SHRIMP chronology recording of single particle zircon. *Acta Geological Sinica*, 91(1): 163~179.
- Ling Wenli, Duan Ruichun, Xie Xianjun, Zhang Yongqing, Zhang Junbo, Cheng Jianping, Liu Xiaoming, Yang Hongmei. 2009. Contrasting geochemistry of the Cretaceous volcanic suites in Shandong province and its implications for the Mesozoic lower crust delamination in the eastern North China craton. *Lithos*, 113: 640~658.
- Liu Shen, Feng Caixia, Zhai Mingguo, Hu Ruizhong, Lai Shaocong, Chen Junjin, Yan Jun. 2016. Zircon U-Pb age, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Early Cretaceous mafic dykes from western Shandong Province, eastern North China Craton, China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 629~645 (in English with Chinese abstract).
- Middlemost, E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37: 215~224.
- Münker C. 1998. Nb/Ta Fractionation in a cambrian arc/back system, new zealand: source constraints and application of refined icpms techniques. *Chem Geol*, 144(1-2): 23~45.
- Miao Baihu, Xu Zhaowen, Wang Hao, Li Haiyong, Yang Xiaonan, Zuo Changhu, Zhao Zengxia. 2015. Genesis and source characteristics of basaltic andesite for the lower Qingshan formation in Zouping basin, Shandong province. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 37~48 (in Chinese with English abstract).
- Ning Peisong, Long Qun, Cheng Ting, Hu Zhaoping, Chen Fukun. 2013. Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic composition of late mesozoic intermediate-basic rock in western Shandong Block. *Journal of earth sciences and environment*, 35(4): 62~76 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Wang Dezi, Zhou Jincheng, Zeng Jiahu. 1996. Geology, geochemistry and genesis of the mesozoic shoshonitic volcanic rocks in Shandong province. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 21(5): 546~552 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Luo Qinghua. 2001.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating and source denoting of K-rich volcanic rocks lamprophyres in western Shandong Province. *Chinese Science Bulletin*, 46(18): 1499~1508 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Hu Jian, Jiang Shaoyong, Wang Rucheng, Xu Xisheng. 2005. Mesozoic-Cenozoic Mafic Magmatism in Western Shandong Province and Its Implication for the Chemical Evolution of the Mantle. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 30(6): 646~658 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiansheng, Liu Liang, Li Youlian, Zhao Jiaolong. 2013. Petrogenesis of potassic volcanic rocks in the middle-south parts of the Yishu deep fault zone: constraints from elemental geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1193~1209 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R I, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Rev Geophys*, 33(3): 267~310.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implication for continental growth and crust-mantle recycling. *J Petrol*, 36: 891~931.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical*

- Geology, 160:335~356.
- Rudnick R L, Gao Shan, Ling Wenli, Liu Yongsheng, McDonough W F. 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North china Craton. *Lithos*, 77: 609~637.
- Ren Tianlong, Hou Jianhua, Zhu Xueqiang, Yang Shipeng, Huang Yongbo, Wang Lijuan. 2015. Geochronology and Geochemistry of the early Mesozoic granites in the Jimo area, Shandong province. *Geological Review*, 61(z1):697~698.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ, *Magmatism in ocean basins*. *Geol Soc London Spec Publ*, 42: 313~345.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford, London, Boston: Blackwell, 312.
- Wu Qi, Niu Manlan, Zhu Guang, Xiang Biwei, Fu Pengyuan, Xia Wenjing. 2013. Petrogenesis of early cretaceous intermediate-felsic volcanic rocks in the Juxian area in the Tan-Lu fault zone and their tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 87(7): 979~993( in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang, Huang Xiaolong, Ma Jinlong, Wang Yanbin, Ilzuka Y, Xu Jifeng, Wang Qiang, Wu Xiangyang. 2004. Crustal-mantle interaction during the thermo-tectonic reactivation of the North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb age, petrology and geochemistry of Mesozoic pluton in western Shandong. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147:750~767.
- Yan Jun, Chen Jiangfeng, Xie Zhi, Zhou Taixi. 2003. Mantle xenoliths from Late Cretaceous basalts in eastern Shandong: New constraints on the timing of lithospheric thinning in eastern China. *Chinese Sci Bull*, 8: 1570~1574.
- Yang Chenghai, Xu Wenliang, Yang Debin, Liu Changchun, Liu Xiaoming, Hu Zhaochu. 2005. Chronology of the Jinan Gabbro in Western Shandong: Evidence from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(4): 321~325 ( in Chinese with English abstract).
- Yang Chenghai, Xu Wenliang, Yang Debin, Liu Changchun, Liu Xiaoming, Hu Zhaochu. 2006. Petrogenesis of the mexozoic High-Mg diorites in west Shandong: evidence from chronology and petro-geochemistry. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 81~92 ( in Chinese with English abstract).
- Ying Jifeng, Zhang Hongfu, Kita N, Morishite Y, Shimoda G. 2006. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Jūnan, Shandong Province. *China Earth and Planetary Science Letters*, 244:622~638.
- Yang Chenghai, Xu Wenliang, Yang Debin, Wang Wei, Wang Weide, Liu Jinming. 2008. Petrogenesis of the Shangyu Gabbro diorites in west Shandong: evidence from chronology and petro-geomistry. *Science in China ( Series D)*, 38(1): 44~55( in Chinese without English abstract).
- Yang Debin, Xu Wenliang, Pei Fuping, Yang Chenghai, Wang Qinghai. 2012. Spatial extent of the influence of the deeply subducted South China Block on the southeasters North China Block: Constraints from Sr-Nd-Pb isotopes in Mesozoic mafic igneous rocks. *lithos*, 136~139:246~260.
- Zindler AW, Hart SR. 1986. *Chemical Geodynamics*. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 14:493~571.
- Zheng Jianping, O'Reilly SY, Griffin WL, Lu Fengxiang, Zhang Ming. 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong peninsula, Sino-Korean craton. *Int Geol Rev*, 40: 471~499.
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang. 1999. Mantle xenoliths from kimberlites, Shandong and Liaoning: Paleozoic mantle character and its heterogeneity. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1):65~74( in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, Fan Weiming, Zhai Mingguo, Ying Jifeng. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: evidence from major-element, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144:241~253.
- Zhou Xinhua, Zhang Hongfu, Ying Jifeng, Chen Lihui. 2005. Geochemical records of subsequent effects of continental deep subduction: discussion of mantle source variations of the Mesozoic lithospheric mantle of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1255~1263 ( in Chinese with English abstract).
- Zhou Qunjun, Xu Wenliang, Yang Debin, Pei Fuping, Wang Wei, Yuan Honglin, Gao Shan. 2013. Modification of The lithospheric mantle by melt derived from recycled continental crust evidenced by wehrlite xenoliths in Early Cretaceous high-Mg diorites from western Shandong. *Science China: Earth Sciences*, 43: 1179~1194 ( in Chinese without English abstract).

## 参 考 文 献

- 池际尚, 路凤香主编. 1996. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社.
- 高林, 陈斌. 2013. 鲁西地块济南辉长岩岩石学、地球化学和 Os-Nd-Sr 同位素研究. *地球科学与环境学报*, 35(2): 19~31.
- 陆松年, 杨春亮, 蒋明媚, 李怀坤, 李惠民. 1996. 前寒武纪大陆地壳演化示踪. 北京: 地质出版社.
- 刘荣, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞. 2003. 鲁西青山组火山岩形成的构造背景及其成因探讨: 主元素和微量元素证据. *地球化学*, 32(4): 306~316.
- 李全忠, 谢智, 陈江峰, 高天山, 喻钢, 钱卉. 2007. 济南和邹平辉长岩的 Pb-Sr-Nd 同位素特征和岩浆源区中下地壳物质贡献. *高校地质学报*, 13(2): 297~310.
- 李海勇, 徐兆文, 陆现彩, 陈立辉, 刘苏明, 杨小男, 张军, 李红超, 陈伟. 2008. 鲁西邹平盆地中生代火山岩的演化: 对地幔源区的约束. *岩石学报*, 24(11): 2537~2547.

李洪奎, 李大鹏, 耿科, 郭宝奎, 嵇传源, 梁太涛. 2017. 胶东地区燕山期岩浆活动及其构造环境——来自单颗粒锆石 SHRIMP 年代学的记录. 地质学报, 91(1): 163~179.

缪柏虎, 徐兆文, 王浩, 李海勇, 杨小男, 左昌虎, 赵增霞. 2015. 山东邹平青山山下亚组玄武安山岩源区性质及成因. 地质学报, 89(1): 37~48.

宁培松, 龙群, 程婷, 胡昭平, 陈福坤. 2013. 鲁西地块晚中生代中一基性岩地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素组成特征. 地球科学与环境学报, 35(4): 62~76.

任天龙, 侯建华, 朱学强, 杨仕鹏, 黄永波, 王丽娟. 2015. 山东即墨地区中生代花岗岩年代学及地球化学特征. 地质评论, 61(21): 697~698.

邱检生, 王德滋, 周金城, 曾家湖. 1996. 山东中生代橄榄安粗岩系火山岩的地质、地球化学特征及岩石成因. 地球科学——中国地质大学学报, 21(5): 546~552.

邱检生, 徐夕生, 罗清华. 2001. 鲁西富钾火山岩和煌斑岩的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar定年及源区示踪. 科学通报, 46(18): 1499~1508.

邱检生, 胡建, 蒋少涌, 王汝成, 徐夕生. 2005. 鲁西中、新生代镁铁质岩浆作用与地幔化学演化. 地球科学——中国地质大学学报, 30(6): 646~658.

邱检生, 刘亮, 李友连, 赵蛟龙. 2013. 沂沭断裂带中南段钾质火山岩的元素地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素组成及其对岩石成因的制约. 地质学报, 87(9): 1193~1209.

山东省地质矿产局. 1991. 山东省区域地质志. 北京: 地质出版社.

吴齐, 牛漫兰, 朱光, 向必伟, 傅朋远, 夏文静. 2013. 郯庐断裂带莒县地区早白垩世中酸性火山岩成因及其地质意义. 地质学报, 87(7): 979~993.

杨承海, 许文良, 杨德彬, 刘长春, 柳小明, 胡兆初. 2005. 鲁西济南辉长岩的形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据. 地球学报, 26(4): 321~325.

杨承海, 许文良, 杨德彬, 刘长春, 柳小明, 胡兆初. 2006. 鲁西中生代高 Mg 闪长岩的成因: 年代学和岩石地球化学证据. 地球科学, 31(1): 81~92.

杨承海, 许文良, 杨德彬, 王伟, 王伟德, 刘金民. 2008. 鲁西上峪辉长一闪长岩的成因: 年代学与岩石地球化学证据. 地球科学, 33(1): 44~55.

郑建平, 陆凤香. 1999. 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, 15(1): 65~74.

周新华, 张宏福, 英基丰, 陈立辉. 2005. 大陆深俯冲后效作用的地球化学记录——华北中生代岩石圈地幔源区特征变异的讨论. 岩石学报, 21(4): 1255~1263.

周群君, 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 王微, 袁洪林, 高山. 2013. 再循环陆壳物质对岩石圈地幔的改造: 鲁西早白垩世高镁闪长岩中异剥橄榄岩捕虏体证据. 中国科学: 地球科学, 43: 1179~1194.

# Geochemistry and Petrogenesis of the Mesozoic Volcanic Rocks from the Qingshan Group in Western Shandong Province

ZHANG Yongqing<sup>1)</sup>, LING Wenli<sup>2)</sup>, ZHANG Junbo<sup>2)</sup>, DUAN Ruichun<sup>3)</sup>,  
REN Bangfang<sup>1)</sup>, YANG Hongmei<sup>3)</sup>

1) *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Tianjin, 300170;*

2) *Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan, 430074;*

3) *Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Wuhan, 430074*

## Abstract

With volcanic rocks of the Mesozoic Qingshan Group in the Xidong area in western Shandong province as study objective, we carried out systematical analysis of element-isotope geochemical analysis on the volcanic rocks to understand source area of magmatic rocks and their petrogenesis. This study will expand the geochemical features of rock sequences in this area.  $\text{SiO}_2$  content of Qingshan Group volcanic rocks ranges from 52.8% to 59.8%, suggesting they belong to calc-alkaline series. The rock assemblage consists of basaltic trachyandesite to trachyandesite.  $\text{SiO}_2$  shows negative relation to  $\text{MgO}$ ,  $\text{TFe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$  and  $\text{TiO}_2$ , but positive to  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Na}_2\text{O}$ . Large ion lithophile elements such as Rb, Ba, Th, U and K are enriched while high field strength elements such as Nb, Ta and Ti are depleted. The total REE ranges from  $100 \times 10^{-6}$  to  $187 \times 10^{-6}$ , with  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 8.2 \sim 11.1$  and no significant Eu anomaly ( $\text{Eu} = 0.9 \sim 1.02$ ). The volcanic rocks have homogeneous and enriched Sr-Nd isotopic compositions with  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{t}}$  ratios of  $0.7047 \sim 0.7050$  and Nd(t) values of  $-16.5 \sim -14.2$ . Nd and Sr isotopic compositions of Qingshan Group volcanic rocks in the Xidong area show no distinct negative relation to  $\text{SiO}_2$ , Nb/Ta and La/Nb has no negative relation, and Nb and Th shows positive relation. All these features indicate that crust contamination had much influence on chemical compositions of magma of Qingshan Group volcanic rocks during the uprising and evolution process of magma. The fact that the volcanic rocks have higher MgO content than melt resulted from partial melting of basalt indicates that forming process of intermediate-mafic volcanic rocks of the Qingshan Group was probably related to interaction between continental crust and mantle rock series. Integrated analysis indicates that the volcanic rocks of Mesozoic Qingshan Group in the Xidong area were the emplacement of partially melting continental lower crust materials onto the Earth surface, which were firstly metasomatized with upper mantle rocks in the mantle environment due to delamination.

**Key words:** Western Shandong Province; Mesozoic; Qingshan Group; geochemistry; petrogenesis