

辽西四合屯早白垩世义县组高镁安山岩的地球化学: 对下地壳拆沉作用和Sr/Y变化的指示*

王晓蕊** 高山 柳小明 袁洪林 胡兆初 张宏 王选策

(西北大学地质学系教育部大陆动力学重点实验室, 西安 710069; 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074; 沈阳地质矿产研究所, 沈阳 110032; 广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要 对辽西四合屯地区义县组火山岩 85 件样品的分析表明, 它们主要由高镁安山岩组成 (Mg#=38~69), 仅底部为玄武岩. 四合屯高镁安山岩具有埃达克岩的地球化学特征 ($\text{SiO}_2=52.82\%\sim 59.31\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=14.15\%\sim 16.35\%$, $\text{Sr}=620\sim 1323\ \mu\text{g/g}$, $\text{Yb}=1.03\sim 1.88\ \mu\text{g/g}$, $\text{Y}=12\sim 20\ \mu\text{g/g}$, $\text{La}_N/\text{Yb}_N=10\sim 25$, $\text{Sr}/\text{Y}=32\sim 88$), 初始Nd-Sr同位素组成为: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(130\ \text{Ma})=0.5118\sim 0.5119$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(130\ \text{Ma})=-11.6\sim -13.8$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(130\ \text{Ma})=0.7058\sim 0.7064$, 与该区晚侏罗世兴隆沟组火山岩具有相似的地球化学特征, 但具有较低的Nd同位素比值. 它们代表了华北克拉通原岩为太古宙的岩石, 后经相变而成的榴辉岩下地壳与岩石圈地幔一同拆沉再循环进入软流圈, 随后榴辉岩部分熔融产生的熔体与地幔橄榄岩相互作用的结果. 但与兴隆沟组火山岩相比, 四合屯安山岩岩浆源区中含有更多Nd同位素组成演化的古老陆壳物质. 四合屯义县组的年龄为 120~130 Ma, 表明拆沉作用一直延续至早白垩世. $\text{SiO}_2 > 56\%$ 的安山岩样品, Sr和Sr/Y比值与 SiO_2 呈负相关关系, 表明它们的Sr含量以及Sr/Y比值明显受岩浆结晶分异影响, 因此对于火山岩Sr/Y比值研究需要考虑结晶分异作用的影响.

关键词 高镁安山岩 埃达克岩 义县组 华北克拉通 下地壳拆沉作用

辽西四合屯地区早白垩世义县组由于含有大量长羽毛或毛状皮肤衍生物的恐龙和早期鸟类等珍稀动物化石而备受世界注目^[1~4]. 四合屯地区义县组主体由火山岩组成, 中上部夹含化石的湖相沉积岩. 按照该区最新研究^[4], 该剖面总厚度为 300~400 m, 其

中火山岩约 300 m, 沉积岩约 50~100 m. 前人已对其中含化石的沉积地层开展了大量高水平研究, 对相关火山岩和火山碎屑岩进行了详细的同位素定年, 结果表明四合屯地区义县组时代为 120~130 Ma^[5~10]. 虽然朱日祥等对义县组火山岩进行了详细的古地磁

2005-01-25 收稿, 2005-05-19 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40133020, 40373013)和教育部创新团队基金资助项目

** E-mail: wang-xiaorui@263.net

研究^[11], 但对占义县组主体的火山岩尚缺乏系统的地球化学研究。

作者于 2002 和 2003 年先后 2 次沿四合屯新开岭至化石观察站义县组标准剖面^[4,12]进行野外工作, 共采集并分析了 85 件火山岩样品, 结果表明该剖面火山岩仅底部为玄武岩, 其余部位均为安山岩($\text{SiO}_2=52.7\%\sim 59.3\%$), 因此前人认为四合屯地区义县组含有大量玄武岩的认识并不准确^[13~15]。由于底部玄武岩和安山岩具有不同的成因(见下), 本文主要研究该剖面底部玄武岩以外的火山岩。

1 地质背景和样品来源

辽西位于华北克拉通北部, 燕山构造带东段^[16]。四合屯位于辽西北票金岭寺-羊山盆地的中部(图 1)。区内出露大量义县组火山岩, 是义县组珍稀化石层(尖山沟层)之下火山岩最发育和完整的地区之一。

本文样品采自北票四合屯新开岭至化石观察站义县组标准剖面(图 1)。该剖面^[4,12]下部出露少量橄榄玄武岩, 厚度仅 7~20 m。橄榄玄武岩之上为构成剖面主体的粗面安山岩, 厚度为 200~300 m。中上部夹含化石的湖相沉积岩。

该剖面安山岩为灰色、灰黑色或紫红色, 具斑状结构、玻晶交织结构或微晶交织结构。斑晶成分主要为橄榄石、辉石、斜长石, 部分安山岩含铬铁矿。岩石一般十分新鲜。斑晶含量不均匀, 一般在 5%~15%。本文所分析样品均经显微镜下观察, 确保无风化蚀变作用。

2 分析方法

分析了四合屯代表性新鲜火山岩样品 85 件, 结果表明仅底部约 20 m 为玄武岩, 其余火山岩均为安山岩。所分析样品中 44 件为安山岩。用于主量和微

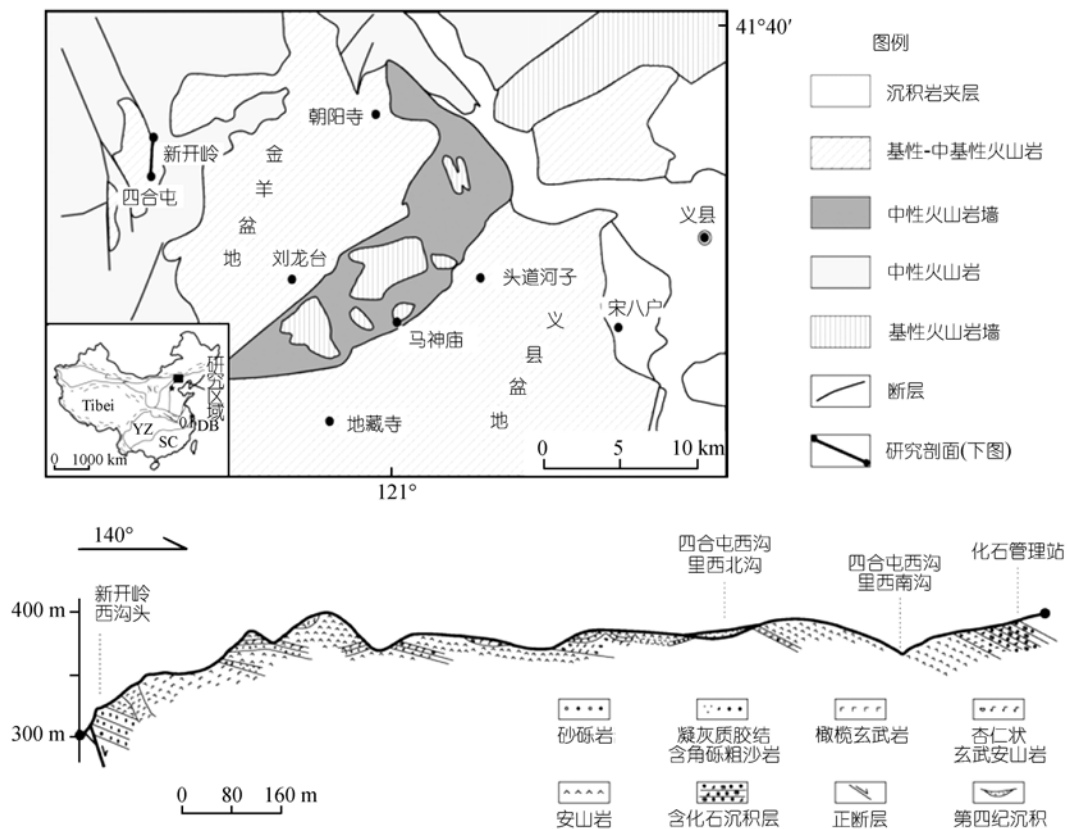


图 1 辽西北票四合屯地区区域地质简图(据文献[12]修改)及采样剖面

表 1 辽西四合屯地区义县组安山岩和页岩部分样品主量元素(%)和微量元素($\mu\text{g/g}$)分析结果^{a)}

| 样品 | SHT-5 | SHT-8 | SHT-10 | SHT-11 | SHT-55 | SHT-56 | SHT-59 | SHT-60 | SHT-61 | SHT-62 | SHT-65 | SHT-66 |
|------------------------------------|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 北纬 | 41°36.128' 41°36.022' 41°35.992' 41°35.966' 41°35.911' 41°35.896' 41°35.886' | | | | | | | | | | | |
| 东经 | 120°46.912' 120°47.000' 120°47.005' 120°46.998' 120°47.123' 120°47.140' 120°47.153' | | | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 57.27 | 57.39 | 58.10 | 67.00 | 57.36 | 56.72 | 57.16 | 57.29 | 57.02 | 57.90 | 59.31 | 57.68 |
| TiO ₂ | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.44 | 0.86 | 0.87 | 0.75 | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.73 | 1.11 |
| Al ₂ O ₃ | 14.69 | 14.74 | 14.97 | 13.07 | 15.25 | 15.14 | 14.79 | 15.02 | 14.83 | 14.85 | 15.94 | 16.35 |
| TF ₂ O ₃ | 6.41 | 6.57 | 6.51 | 2.13 | 6.72 | 6.94 | 6.48 | 6.38 | 6.44 | 6.30 | 5.40 | 7.64 |
| MnO | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 0.01 | 0.12 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.04 | 0.11 |
| MgO | 6.18 | 6.42 | 5.81 | 1.65 | 6.01 | 6.10 | 6.33 | 4.84 | 6.15 | 6.18 | 3.61 | 2.39 |
| CaO | 5.36 | 5.25 | 5.31 | 1.75 | 5.82 | 5.99 | 5.30 | 5.83 | 5.52 | 5.14 | 4.83 | 2.90 |
| Na ₂ O | 4.19 | 4.12 | 4.16 | 2.06 | 3.78 | 3.51 | 4.06 | 4.14 | 4.10 | 4.08 | 4.07 | 5.01 |
| K ₂ O | 2.70 | 2.63 | 2.74 | 5.59 | 1.76 | 2.03 | 2.69 | 2.69 | 2.71 | 2.71 | 3.47 | 3.30 |
| P ₂ O ₅ | 0.48 | 0.47 | 0.48 | 0.35 | 0.28 | 0.26 | 0.48 | 0.56 | 0.52 | 0.46 | 0.38 | 0.29 |
| LOI | 1.53 | 1.20 | 1.22 | 4.61 | 1.81 | 2.13 | 1.48 | 1.90 | 1.54 | 1.33 | 1.76 | 2.90 |
| TOTAL | 99.65 | 99.63 | 100.13 | 98.66 | 99.77 | 99.77 | 99.60 | 99.52 | 99.67 | 99.76 | 99.53 | 99.66 |
| Na ₂ O/K ₂ O | 1.55 | 1.57 | 1.52 | 0.37 | 2.15 | 1.73 | 1.51 | 1.54 | 1.51 | 1.51 | 1.17 | 1.52 |
| Na ₂ O+K ₂ O | 6.89 | 6.75 | 6.90 | 7.65 | 5.54 | 5.54 | 6.75 | 6.83 | 6.81 | 6.79 | 7.54 | 8.30 |
| Mg# | 66 | 66 | 64 | 61 | 64 | 64 | 66 | 60 | 65 | 66 | 57 | 38 |
| Li | 23 | 18 | 21 | 35 | 33 | 32 | 27 | 30 | 30 | 27 | 24 | 19 |
| Be | 2.00 | 1.91 | 2.01 | 2.32 | 1.84 | 1.71 | 2.32 | 2.42 | 2.41 | 2.28 | 2.46 | 2.60 |
| Sc | 14 | 14 | 14 | 8 | 17 | 17 | 15 | 16 | 17 | 15 | 15 | 21 |
| V | 118 | 114 | 112 | 125 | 122 | 125 | 125 | 130 | 125 | 118 | 94 | 106 |
| Cr | 295 | 311 | 295 | 39 | 382.9 | 332.6 | 367.9 | 348.7 | 373.2 | 352.1 | 430.8 | 606.4 |
| Co | 33 | 33 | 34 | 10 | 47 | 42 | 36 | 33 | 36 | 34 | 33 | 50 |
| Ni | 177 | 180 | 187 | 21 | 209 | 193 | 198 | 195 | 196 | 196 | 200 | 378 |
| Cu | 43 | 34 | 33 | 24 | 38 | 40 | 39 | 37 | 31 | 33 | 40 | 72 |
| Zn | 69 | 70 | 69 | 52 | 76 | 71 | 77 | 81 | 78 | 78 | 73 | 76 |
| Ga | 19 | 19 | 19 | 16 | 20 | 20 | 21 | 21 | 22 | 20 | 22 | 17 |
| Ge | | | | | 1.24 | 1.28 | 1.25 | 1.24 | 1.27 | 1.29 | 1.17 | 0.92 |
| Rb | 75 | 73 | 77 | | 44 | 41 | 75 | 69 | 70 | 76 | 115 | 87 |
| Rb(XRF) | 75 | 73 | 77 | 176 | 41 | 40 | 72 | 67 | 70 | 73 | 110 | 84 |
| Sr | 946 | 903 | 903 | | 795 | 696 | 1003 | 1199 | 1080 | 933 | 1095 | 721 |
| Sr(XRF) | 946 | 903 | 903 | 338 | 737 | 663 | 920 | 1096 | 987 | 860 | 981 | 642 |
| Y | | | | | 16 | 16 | 14 | 14 | 14 | 14 | 15 | 19 |
| Y(XRF) | 12 | 13 | 14 | 15 | 15 | 16 | 14 | 14 | 14 | 14 | 15 | 18 |
| Zr | 171 | 172 | 172 | 159 | 168 | 156 | 170 | 173 | 169 | 169 | 197 | 191 |
| Zr(XRF) | 164 | 167 | 169 | | 161 | 163 | 164 | 172 | 163 | 167 | 192 | 183 |
| Nb | 10 | 10 | 10 | 12 | 11 | 10 | 10 | 11 | 10 | 10 | 11 | 7 |
| Cs | 1.50 | 1.02 | 1.91 | 7.20 | 1.53 | 1.27 | 1.61 | 0.92 | 1.50 | 1.79 | 1.37 | 1.36 |
| Ba | 1075 | 1042 | 1077 | 755 | 958 | 814 | 1034 | 1161 | 1075 | 1025 | 1008 | 1270 |
| Ba(XRF) | 1005 | 991 | 1013 | | 955 | 835 | 998 | 1153 | 1039 | 1033 | 1009 | 1287 |
| La | 36 | 35 | 36 | 38 | 29 | 27 | 32 | 35 | 34 | 32 | 42 | 26 |
| Ce | 69 | 68 | 69 | 76 | 56 | 53 | 63 | 68 | 66 | 61 | 76 | 52 |
| Pr | 7.8 | 7.7 | 7.8 | 8.4 | 6.6 | 6.1 | 7.4 | 7.9 | 7.7 | 7.0 | 8.9 | 6.7 |
| Nd | 30 | 30 | 31 | 32 | 26 | 24 | 28 | 31 | 29 | 27 | 33 | 27 |
| Sm | 5.00 | 4.92 | 5.01 | 5.27 | 4.56 | 4.34 | 4.57 | 4.89 | 4.81 | 4.43 | 5.35 | 5.42 |
| Eu | 1.45 | 1.45 | 1.47 | 1.14 | 1.33 | 1.28 | 1.31 | 1.40 | 1.38 | 1.28 | 1.46 | 1.68 |
| Gd | 3.78 | 3.72 | 3.83 | 4.16 | 3.64 | 3.61 | 3.46 | 3.62 | 3.58 | 3.39 | 3.91 | 4.40 |
| Tb | 0.54 | 0.53 | 0.55 | 0.61 | 0.54 | 0.54 | 0.50 | 0.51 | 0.51 | 0.49 | 0.55 | 0.65 |
| Dy | 2.62 | 2.64 | 2.67 | 3.09 | 2.71 | 2.76 | 2.44 | 2.46 | 2.48 | 2.38 | 2.61 | 3.37 |
| Ho | 0.49 | 0.49 | 0.50 | 0.60 | 0.50 | 0.53 | 0.44 | 0.45 | 0.45 | 0.44 | 0.46 | 0.65 |
| Er | 1.24 | 1.27 | 1.27 | 1.56 | 1.30 | 1.37 | 1.18 | 1.19 | 1.21 | 1.17 | 1.23 | 1.69 |
| Tm | 0.18 | 0.18 | 0.18 | 0.24 | 0.18 | 0.20 | 0.17 | 0.16 | 0.17 | 0.16 | 0.17 | 0.24 |
| Yb | 1.16 | 1.19 | 1.21 | 1.61 | 1.23 | 1.30 | 1.10 | 1.11 | 1.12 | 1.10 | 1.12 | 1.58 |
| Lu | 0.18 | 0.18 | 0.19 | 0.26 | 0.19 | 0.20 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.23 |
| Hf | 4.27 | 4.47 | 4.25 | 4.32 | 3.74 | 3.63 | 3.95 | 4.08 | 4.05 | 3.93 | 4.31 | 4.41 |
| Ta | 0.52 | 0.56 | 0.55 | 0.85 | 0.69 | 0.63 | 0.50 | 0.51 | 0.50 | 0.52 | 0.59 | 0.47 |
| Pb | 17 | 16 | 17 | 21 | 13 | 12 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 18 |
| Th | 6.44 | 6.41 | 6.43 | 10.65 | 5.78 | 5.35 | 6.31 | 6.60 | 6.51 | 6.28 | 7.63 | 9.78 |
| U | 1.49 | 1.49 | 1.51 | 4.61 | 1.50 | 1.29 | 1.56 | 1.63 | 1.58 | 1.53 | 1.73 | 1.91 |
| Sr/Y | 76 | 67 | 63 | 23 | 49 | 41 | 66 | 78 | 71 | 61 | 65 | 36 |
| La _N /Yb _N | 21 | 20 | 20 | 16 | 16 | 14 | 20 | 21 | 21 | 19 | 25 | 11 |
| Eu/Eu* | 1.02 | 1.04 | 1.02 | 0.75 | 1.00 | 0.99 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 0.97 | 1.05 |
| Yb _N | 4.70 | 4.79 | 4.88 | 6.48 | 4.96 | 5.24 | 4.44 | 4.47 | 4.50 | 4.43 | 4.53 | 6.39 |

续表

| 样品 | SHT-67 | SHT-68 | SHT-69 | SHT-70 | SHT-71 | SHT-72 | SHT-73 | SHT-74 | SHT-77 | SHT-80 | SHT-83 |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 北纬 | 41°35.886' | 41°35.669' | 41°35.646' | 41°35.614' | 41°35.625' | 41°35.610' | 41°35.625' | 41°35.587' | 41°35.497' | 41°35.511' | 41°35.312' |
| 东经 | 120°47.153' | 120°47.257' | 120°47.306' | 120°47.333' | 120°47.334' | 120°47.386' | 120°47.414' | 120°47.572' | 120°47.547' | 120°47.499' | 120°47.534' |
| SiO ₂ | 58.84 | 57.24 | 56.99 | 57.34 | 57.60 | 57.63 | 57.69 | 57.13 | 56.38 | 56.62 | 55.25 |
| TiO ₂ | 0.72 | 0.69 | 0.76 | 0.75 | 0.75 | 0.74 | 0.74 | 0.77 | 0.76 | 0.78 | 1.08 |
| Al ₂ O ₃ | 15.80 | 14.15 | 14.64 | 14.75 | 14.84 | 14.99 | 14.82 | 14.71 | 14.90 | 15.43 | 15.59 |
| TF ₂ O ₃ | 5.00 | 5.93 | 6.36 | 6.40 | 6.32 | 6.11 | 6.33 | 6.33 | 6.45 | 6.34 | 7.32 |
| MnO | 0.04 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.08 | 0.07 | 0.10 | 0.08 | 0.08 |
| MgO | 4.60 | 6.18 | 6.16 | 6.36 | 6.28 | 5.94 | 6.59 | 6.00 | 5.51 | 5.50 | 3.56 |
| CaO | 4.47 | 5.14 | 5.45 | 5.30 | 5.32 | 5.26 | 5.23 | 5.52 | 5.65 | 5.60 | 6.84 |
| Na ₂ O | 3.93 | 3.89 | 4.19 | 4.07 | 4.01 | 4.15 | 4.05 | 4.13 | 4.02 | 4.16 | 3.93 |
| K ₂ O | 3.55 | 2.82 | 2.69 | 2.58 | 2.61 | 2.62 | 2.60 | 2.69 | 2.71 | 2.84 | 2.73 |
| P ₂ O ₅ | 0.37 | 0.35 | 0.54 | 0.47 | 0.46 | 0.47 | 0.46 | 0.54 | 0.54 | 0.58 | 0.57 |
| LOI | 2.36 | 2.06 | 1.94 | 1.49 | 1.33 | 1.58 | 1.17 | 1.89 | 2.52 | 2.34 | 2.59 |
| TOTAL | 99.68 | 99.52 | 99.79 | 99.55 | 99.59 | 99.55 | 99.76 | 99.78 | 99.54 | 100.27 | 99.54 |
| Na ₂ O/K ₂ O | 1.11 | 1.38 | 1.56 | 1.58 | 1.54 | 1.58 | 1.56 | 1.54 | 1.48 | 1.46 | 1.44 |
| Na ₂ O+K ₂ O | 7.48 | 6.71 | 6.88 | 6.65 | 6.62 | 6.77 | 6.65 | 6.82 | 6.73 | 7.00 | 6.66 |
| Mg# | 65 | 67 | 66 | 66 | 66 | 66 | 67 | 65 | 63 | 63 | 49 |
| Li | 14.01 | 22 | 36 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 23 | 22 | 18 |
| Be | 2.26 | 2.31 | 2.33 | 2.33 | 2.47 | 2.37 | 2.37 | 2.18 | 2.15 | 2.40 | 1.87 |
| Sc | 15.68 | 14 | 16 | 15 | 16 | 16 | 15 | 17 | 16 | 17 | 15 |
| V | 89 | 99 | 125 | 124 | 125 | 118 | 122 | 134 | 130 | 132 | 121 |
| Cr | 395 | 389.1 | 366.4 | 375.8 | 361.0 | 359.0 | 377.5 | 390.7 | 386.0 | 416.1 | 208.4 |
| Co | 28 | 32 | 37 | 37 | 35 | 39 | 39 | 37 | 33 | 33 | 35 |
| Ni | 196 | 205 | 194 | 207 | 200 | 183 | 201 | 194 | 185 | 204 | 124 |
| Cu | 32 | 21 | 41 | 41 | 40 | 35 | 37 | 46 | 40 | 50 | 45 |
| Zn | 63 | 63 | 76 | 74 | 74 | 72 | 71 | 85 | 77 | 84 | 87 |
| Ga | 20.57 | 20 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 22 | 22 | 23 | 20 |
| Ge | 1.09 | 1.13 | 1.20 | 1.23 | 1.28 | 1.26 | 1.25 | 1.35 | 1.11 | 1.35 | 1.20 |
| Rb | 95 | 75 | 70 | 73 | 75 | 73 | 76 | 75 | 73 | 73 | 62 |
| Rb(XRF) | 91 | 76 | 69 | 69 | 70 | 70 | 72 | 69 | 70 | 68 | 60 |
| Sr | 1020 | 1092 | 1217 | 992 | 1006 | 973 | 966 | 1218 | 1135 | 1323 | 1049 |
| Sr(XRF) | 939 | 1033 | 1102 | 889 | 895 | 898 | 875 | 1057 | 1037 | 1179 | 1026 |
| Y | 15 | 13 | 14 | 14 | 14 | 13 | 14 | 14 | 14 | 15 | 18 |
| Y(XRF) | 16 | 13 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 13 | 14 | 18 |
| Zr | 197 | 179 | 175 | 169 | 175 | 171 | 170 | 177 | 175 | 191 | 207 |
| Zr(XRF) | 194 | 178 | 164 | 163 | 162 | 167 | 164 | 167 | 168 | 179 | 204 |
| Nb | 11.50 | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | 13 |
| Cs | 0.67 | 1.02 | 1.77 | 1.24 | 1.24 | 1.06 | 1.16 | 1.82 | 1.07 | 0.84 | 0.73 |
| Ba | 1012 | 1090 | 1171 | 1044 | 1035 | 1041 | 1020 | 1116 | 1066 | 1161 | 1042 |
| Ba(XRF) | 992 | 1078 | 1130 | 1010 | 1008 | 1020 | 996 | 1080 | 1067 | 1109 | 1061 |
| La | 43.10 | 37 | 35 | 32 | 32 | 32 | 32 | 35 | 34 | 39 | 47 |
| Ce | 75.83 | 70 | 70 | 63 | 63 | 62 | 62 | 69 | 67 | 75 | 93 |
| Pr | 9.18 | 8.0 | 8.0 | 7.1 | 7.2 | 7.1 | 7.0 | 7.9 | 7.7 | 8.8 | 10.8 |
| Nd | 34.68 | 30 | 31 | 27 | 27 | 27 | 27 | 30 | 30 | 34 | 42 |
| Sm | 5.52 | 4.89 | 4.94 | 4.50 | 4.54 | 4.49 | 4.41 | 4.87 | 4.78 | 5.30 | 6.71 |
| Eu | 1.49 | 1.40 | 1.43 | 1.33 | 1.32 | 1.32 | 1.30 | 1.42 | 1.38 | 1.49 | 1.85 |
| Gd | 4.01 | 3.59 | 3.62 | 3.42 | 3.45 | 3.43 | 3.35 | 3.59 | 3.53 | 3.85 | 4.97 |
| Tb | 0.56 | 0.51 | 0.51 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.48 | 0.51 | 0.50 | 0.54 | 0.70 |
| Dy | 2.71 | 2.43 | 2.49 | 2.41 | 2.43 | 2.41 | 2.40 | 2.48 | 2.48 | 2.65 | 3.37 |
| Ho | 0.48 | 0.44 | 0.44 | 0.44 | 0.44 | 0.44 | 0.44 | 0.45 | 0.44 | 0.46 | 0.59 |
| Er | 1.30 | 1.17 | 1.19 | 1.19 | 1.21 | 1.16 | 1.17 | 1.21 | 1.19 | 1.26 | 1.57 |
| Tm | 0.18 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.23 |
| Yb | 1.20 | 1.09 | 1.11 | 1.13 | 1.12 | 1.07 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.14 | 1.42 |
| Lu | 0.18 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.22 |
| Hf | 4.25 | 4.04 | 4.06 | 3.94 | 3.94 | 3.94 | 3.87 | 4.07 | 4.00 | 4.29 | 4.57 |
| Ta | 0.58 | 0.54 | 0.50 | 0.51 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.52 | 0.62 |
| Pb | 14.84 | 15 | 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | 18 | 16 | 19 | 12 |
| Th | 7.26 | 6.96 | 6.56 | 6.30 | 6.41 | 6.34 | 6.26 | 6.79 | 6.66 | 7.28 | 5.07 |
| U | 1.69 | 1.25 | 1.63 | 1.54 | 1.54 | 1.41 | 1.53 | 1.64 | 1.56 | 1.45 | 1.11 |
| Sr/Y | 58.69 | 79 | 79 | 64 | 64 | 64 | 63 | 76 | 80 | 84 | 57 |
| La _N /Yb _N | 24.35 | 23 | 21 | 19 | 19 | 20 | 19 | 21 | 21 | 23 | 22 |
| Eu/Eu* | 0.97 | 1.02 | 1.03 | 1.04 | 1.02 | 1.03 | 1.03 | 1.04 | 1.03 | 1.01 | 0.98 |
| Yb _N | 4.82 | 4.39 | 4.48 | 4.54 | 4.52 | 4.32 | 4.45 | 4.45 | 4.42 | 4.60 | 5.73 |

a) 除样品SHT-11 为页岩, 其余样品均为安山岩。安山岩中除SHT-66 以外, 其余具为高镁安山岩(Mg#>45)。西北大学大陆动力学教育部重点实验室测试

$=0.5118\sim 0.5119$, $\varepsilon_{Nd}(130\text{ Ma})=-11.6\sim -13.8$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(130\text{ Ma})=0.7058\sim 0.7064$.

在 Yb_N 比 La_N/Yb_N 判别图上(图 4(a)), 所分析的火山岩样品, 约 75% 的样品落在典型的埃达克岩范围内, 其余 25% 的样品落在埃达克岩与岛弧钙碱性火山岩重叠区. 在 Y 比 Sr/Y 判别图上^[19](图 4(b)), 约有 12% 的样品落在典型的埃达克岩区, 56% 的样品落在埃达克岩与岛弧钙碱性火山岩重叠区, 其余样品落在一般岛弧钙碱性火山岩区.

埃达克岩主量元素方面以 SiO_2 56%, 高 Na_2O (Na_2O 3.5%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}>2$)、相对高 Al_2O_3 (>15%) 和低 $\text{MgO}<3\%$ 为特征. 微量元素方面, 高 Sr (>400 $\mu\text{g/g}$), 相对于钙碱性的英安岩(平均 Cr=8 $\mu\text{g/g}$, Ni=5 $\mu\text{g/g}$), 高 Cr(10~50 $\mu\text{g/g}$) 和 Ni(20~40 $\mu\text{g/g}$), HREE 亏损, 低 Yb(1.8 $\mu\text{g/g}$) 和 Y(18 $\mu\text{g/g}$), Sr/Y>40, La/Yb>20^[19-22]. 由以上分析可以看出, 四合屯火山岩与辽西兴隆沟组火山岩类似^[18], 具有高 Mg#, 高 Sr 和低 Y 的高镁埃达克岩的地球化学特征.

4 讨论

4.1 结晶过程对岩浆 Sr/Y 比值的影响

Y 对 Sr/Y 比值图(图 4(b))是判别埃达克岩的重要图解. 在此图中, 所分析样品中有部分样品并没有落在埃达克岩区域中. 由图 5 可见, SiO_2 含量>56% 的样品其 SiO_2 与 Sr/Y 或 Sr 表现出明显的负相关, 相关系数分别为 -0.83 和 -0.80, 但 SiO_2 与 Y 没有明显的相关性(相关系数为 0.30), 即随 SiO_2 含量增高, 火山岩的

Sr/Y 比值和 Sr 明显降低, 而 Y 则没有明显变化, Sr/Y 比值的降低主要是由 Sr 含量的降低引起的. La/Sm 比值随 La 含量的变化情况, 用来示踪岩浆中微量元素的变化是受部分熔融还是结晶分异作用控制^[23]. 由图 6 可见, 四合屯安山岩样品中除 SHT-82 外, 其余样品 La/Sm 比值在 6.3~7.8 之间, 基本不随 La 含量变化, 表明样品主要受岩浆结晶分异作用的影响. 应用瑞利分离结晶模型进行岩浆结晶分异模拟, 选择结晶矿物相为辉石(单斜辉石和斜方辉石)和斜长石. 虽然薄片中有橄榄石斑晶存在, 但由于 Sr 和 Y 在橄榄石中的分配系数很小($D_{\text{Sr}}^{\text{橄榄石/岩浆}}=0.008$ ^[24], $D_{\text{Y}}^{\text{橄榄石/岩浆}}=0.0036$ ^[25]), 橄榄石的结晶对 Sr 和 Y 的相对含量不会造成明显影响, 因此可不考虑. 模拟结果见图 7, 由该图可见, 由于 Sr 在斜长石与岩浆之间的分配系数($D_{\text{Sr}}^{\text{斜长石/岩浆}}=5.28$ ^[26])远远高于在辉石与岩浆之间的分配系数($D_{\text{Sr}}^{\text{辉石/岩浆}}=0.28$ ^[26]), 相反, Y 在斜长石与岩浆之间的分异系数很小($D_{\text{Y}}^{\text{斜长石/岩浆}}=0.066$ ^[26]), 在辉石与岩浆之间的分异系数较高($D_{\text{Y}}^{\text{辉石/岩浆}}=2.4$ ^[26]), 表明 Sr 大量分配在斜长石中, 因此斜长石的结晶是控制岩浆中 Sr 含量的主要因素. 由图 7(a)可见, 当结晶的辉石与斜长石之比从 1:1 变化至 1:2, 随 F 值的降低(对应于结晶程度增加), 残余岩浆中 Sr 含量明显降低, 而 Y 含量有可能增加(当晶出的辉石量<斜长石的量)或降低(当晶出的辉石量>斜长石的量)(图 7(b)), 但变化幅度小于 Sr, 从而造成 Sr/Y 比值均降低(图 7(c)). 上述模拟, 结合所研究的四合屯安山岩含有斜长石斑晶, 且 SiO_2 与 Sr 呈明显负相关性, 但与 Y 之间相

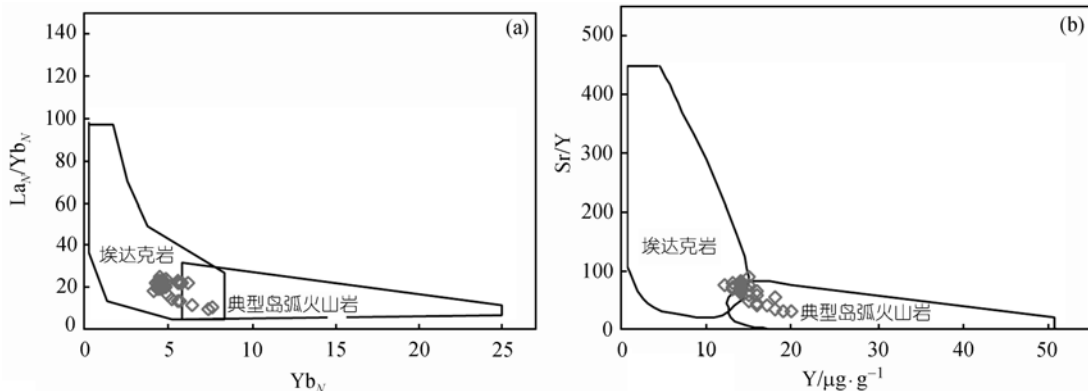


图 4 四合屯安山岩样品 Yb_N 比 La_N/Yb_N (a) 与 Y 比 Sr/Y(b) 判别图^[19]

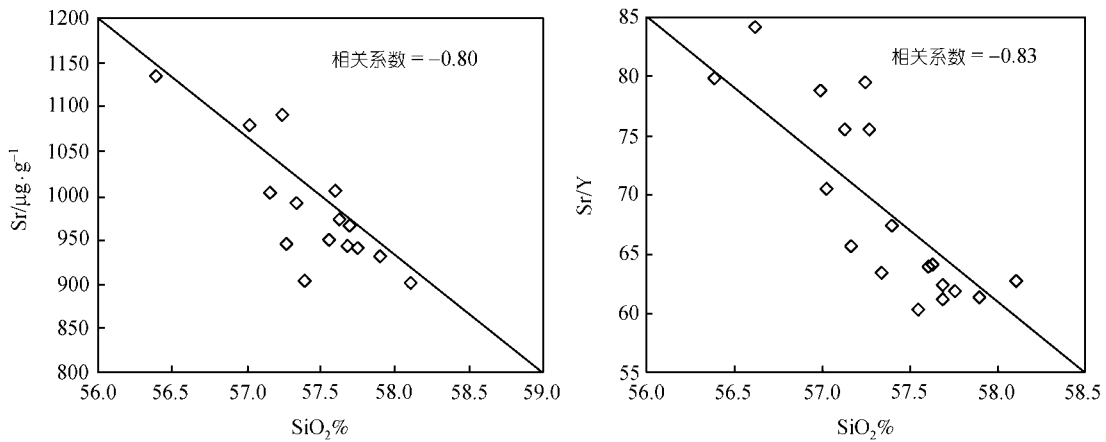


图 5 $\text{SiO}_2 > 56\%$ 的四合屯安山岩样品 SiO_2 与 Sr 和 SiO_2 与 Sr/Y 的相关图

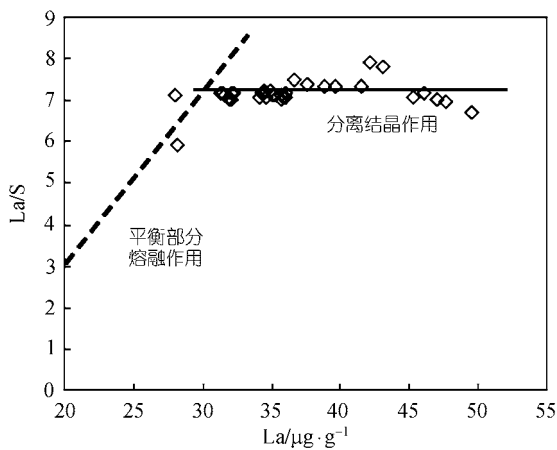


图 6 $\text{SiO}_2 > 56\%$ 的四合屯安山岩样品 La/Sm-La 图^[23]

该图表明四合屯安山岩微量元素含量的变化主要受结晶分异作用控制。相关性不明显，一致证明四合屯那些低 Sr 含量和 Sr/Y 比值的安山岩是斜长石结晶造成的。也就是说， SiO_2 含量较低的高 Sr 和高 Sr/Y 样品代表了演化程度较低更接近于原始岩浆特征的样品，而低 Sr 和低 Sr/Y 比值的样品是演化的产物。因此，四合屯安山岩原始岩浆具有埃达克岩的高 Sr 低 Y 特征。

4.2 四合屯高镁安山岩的成因

四合屯底部橄榄玄武岩的初始 Nd 同位素组成为： $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(130 \text{ Ma})=0.5124\sim 0.5125$ ， $\epsilon_{\text{Nd}}(130 \text{ Ma})=0.29\sim -2.11$ ，而上部高镁安山岩为： $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(130 \text{ Ma})=0.5118\sim 0.5119$ ， $\epsilon_{\text{Nd}}(130 \text{ Ma})=-11.6\sim -13.8$ ，证明下部橄榄玄武岩与上部高镁安山岩成因不同，高镁安山

岩不是橄榄玄武岩分异结晶的产物。

细粒碎屑沉积岩(页岩、泥岩、粉砂岩)是出露地表的大陆上地壳岩石的天然混合样品^[27]。SHT-11 为剖面上部含化石的湖相沉积薄层页岩。该样品除具较明显的 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.75$)外，REE 分配模式与下覆安山岩一致。说明其下覆安山岩是湖相沉积页岩的主要物源。与安山岩相比，湖相沉积页岩低的 Eu、Sr 和 Ti 含量是因为安山岩在风化、剥蚀和搬运过程中，一方面斜长石优先风化，另一方面磁铁矿和钛铁矿等副矿物富集在粗粒的碎屑岩(如砂岩)中。与全球典型后太古宙页岩如澳大利亚后太古宙平均页岩 PAAS($\text{Mg}\#=38$)^[28]、中国东部平均后太古宙页岩($\text{Mg}\#=30$)和 华北克拉通后太古宙平均页岩($\text{Mg}\#=38$)^[29]相比，SHT-11 的 $\text{Mg}\#$ ($\text{Mg}\#=61$)异常高，与下覆四合屯安山岩相近($\text{Mg}\#=63$)。上述 REE 分配模式和 $\text{Mg}\#$ 特征证明，四合屯火山岩整体是十分高 Mg 的，且湖相沉积岩源区主要来自下覆安山岩。

如前所述，四合屯高镁安山岩具有高镁埃达克岩的地球化学特征，还具明显的 Nb、Ta 负异常和 Pb 正异常以及演化的 Nd-Sr 同位素等大陆地壳来源的特征。已有研究认为，高镁安山岩和埃达克岩的成因主要有 4 种：(1) 含水地幔的部分熔融^[30~32]；(2) 俯冲洋壳板片产生的熔体和地幔楔相互作用^[33~36]；(3) 加厚基性下地壳的熔融^[37,38]；(4) 拆沉的下地壳熔融^[18,39,40]。以上四种成因中除(1)外，具有高 Sr 低 Y 和亏损 HREE 特征的岩浆在其平衡残余体中富含石榴石，

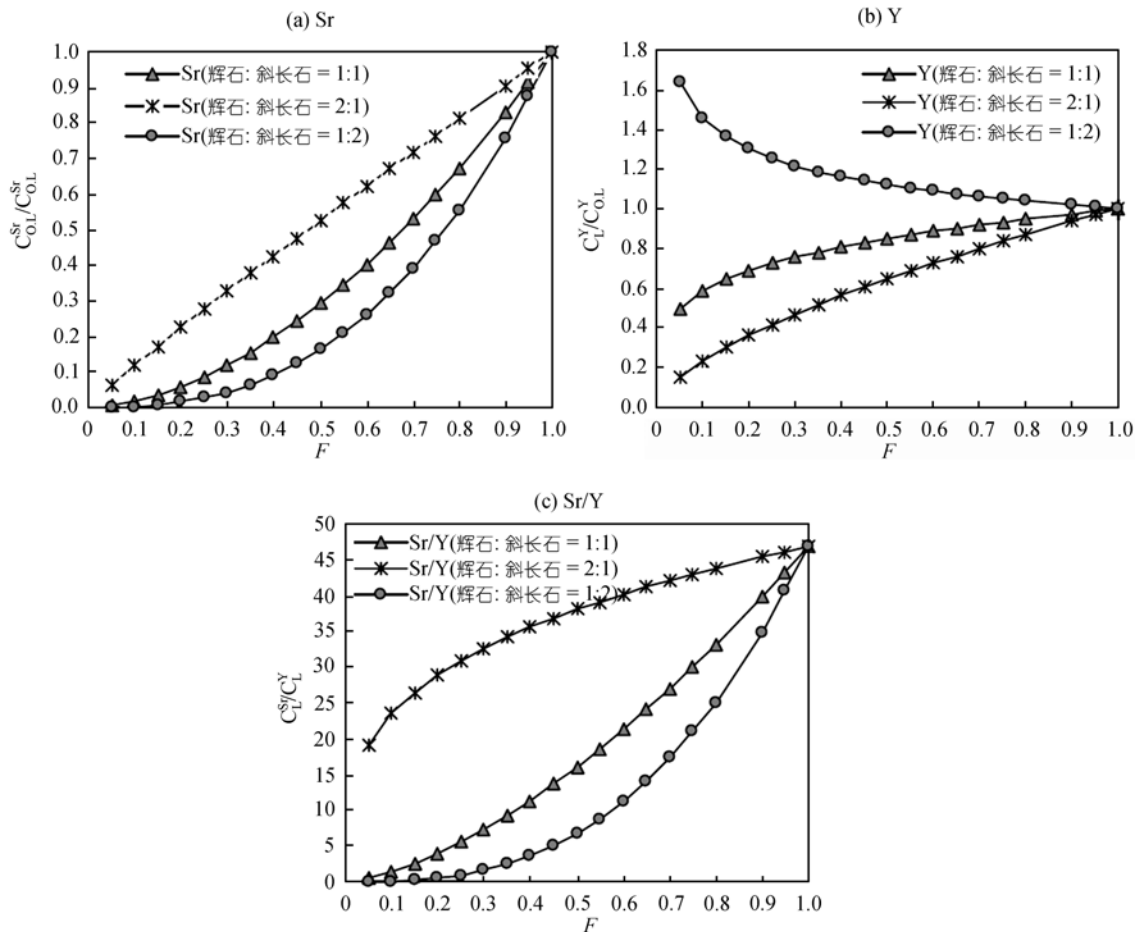


图 7

给出了安山岩结晶过程中, 残余岩浆的Sr和Y含量相对于初始岩浆的含量变化与结晶度 F (F 为原始岩浆与残余岩浆之比, $F=1$ 和 0 分别表示无矿物结晶和岩浆完全结晶)之间关系的模拟。模拟采用瑞利分离结晶模型。结晶矿物为辉石(假设单斜辉石和斜方辉石各占50%)和斜长石。其中 C_0^L 为Sr在原始岩浆中的浓度, C_L^{Sr} 为Sr在残余岩浆中的浓度, C_0^Y 为Y在原始岩浆中的浓度, C_L^Y 为Y在残余岩浆中的浓度; Sr, Y在辉石和斜长石之间的分配系数取自Earth Reference Data and Model数据库^[26], 原始熔体中Sr, Y的浓度由 SiO_2 含量最低的安山岩样品(SHT-58)中Sr, Y的含量代表。图中分别表示了辉石与斜长石比例为1:1, 2:1和1:2时岩浆中Sr(a), Y(b)含量和Sr/Y比值(c)随结晶度 F 的变化。由图可见, 在所模拟的三种情形下, 残余岩浆的Sr/Y比值均随岩浆结晶作用的进行而降低

不含长石, 对应基性源岩的熔融发生在石榴石稳定区内^[41~43], 源岩应为榴辉岩或石榴角闪岩。如果残留相有斜长石, Sr在斜长石中的分配系数较大, 从而导致熔体中Sr的亏损而不是富集^[41,42]。如果是石榴角闪岩部分熔融产生, 熔体水含量应较高, 岩石样品中应具有角闪石等含水矿物斑晶^[43], 而四合屯安山岩薄片中没有发现角闪石、云母等含水矿物, 说明岩浆应是无水的, 因此四合屯安山岩岩浆更可能来源于榴辉岩而不是石榴角闪岩的部分熔融。

四合屯岩石中含有橄榄石斑晶和铬铁矿, 表明不可能由下地壳直接部分熔融产生。高镁安山岩中高的MgO(2.39%~6.88%)、Cr(187~580 $\mu\text{g/g}$)和Ni(89~290 $\mu\text{g/g}$)含量暗示岩浆在上升过程中, 与地幔橄榄岩之间发生了反应。如果四合屯安山岩是由俯冲板片部分熔融产生的, 则应具有类似MORB的Sr-Nd同位素组成($\epsilon_{Nd} \approx 10$)^[19], 而如前所述四合屯高镁安山岩具有明显演化的Sr-Nd同位素组成($\epsilon_{Nd}(130 \text{ Ma}) = -11.6 \sim -13.8$)。如果四合屯安山岩确来自俯冲板片的

部分熔融, 则一定经历了明显的地壳混染. 四合屯安山岩的 SiO_2 与初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (130 Ma)之间无相关性(相关系数=0.14), 证明Nd同位素组成代表了源区的特征, 而不是岩浆上升过程中受地壳混染的产物. 另外, 四合屯安山岩无论分异程度如何, 均不含角闪石等含水矿物, 表明岩浆是无水(anhydrous)的, 这与俯冲板片有关的岩浆通常是含水(hydrous)的特征不符^[44]. 这些证据表明, 四合屯高镁安山岩不是俯冲板片熔体与地幔楔相互作用的产物.

对义县组下覆晚侏罗世兴隆沟组高镁埃达克岩、高镁安山岩和高镁英安岩的矿物学和地球化学研究证明^[18], 它们是华北克拉通原岩为太古宙的岩石, 后经相变而成的榴辉岩下地壳与岩石圈地幔一同拆沉再循环进入软流圈, 随后榴辉岩部分熔融产生的熔体与地幔橄榄岩相互作用的结果. 对兴隆沟组火山岩的锆石定年表明, 拆沉作用至少在 159 Ma 已开始, 并延续至 144 Ma. 四合屯义县组高镁安山岩表现出与兴隆沟组火山岩相似的地球化学特征, 因此我们将四合屯高镁安山岩同样解释为是中生代增厚形成的华北克拉通下地壳榴辉岩拆沉进入软流圈地幔后发生部分熔融, 熔体在上升过程中与地幔橄榄岩反应形成具有高镁特征的产物. 但与兴隆沟组火山岩(ϵ_{Nd} (130 Ma)=1.9~2.9)^[18]相比, 四合屯火山岩具有明显低的初始 ϵ_{Nd} 值(-11~-14), 这要求岩浆源区中含有更多Nd同位素组成演化的古老陆壳物质. 如前所述, 义县组的年龄为 120~130 Ma, 表明拆沉作用一直延续至早白垩世.

5 结论

本文通过对四合屯义县组火山岩详细的岩石学、地球化学研究, 得出以下认识:

(1) 四合屯火山岩仅底部为玄武岩, 其余均为安山岩. 安山岩大部分是高镁($\text{Mg}\#>45$)的, $\text{Mg}\#$ 为 38~69. 其中演化程度较低的样品具有类似埃达克岩的高 Sr(620~1324 $\mu\text{g/g}$)、低 Y(13~20 $\mu\text{g/g}$)的地球化学特征. 安山岩上覆湖相薄层页岩亦是高镁的, 且具有与安山岩相似的稀土元素分配模式, 进一步证明四合屯义县组火山岩整体是高镁的.

(2) 四合屯安山岩的Sr, Y含量以及Sr/Y比值明显

受岩浆结晶分异影响. $\text{SiO}_2>56\%$ 的部分样品, Sr/Y比值与 SiO_2 呈负相关关系. 因此, 对于火山岩的Sr、Y和Sr/Y的研究需要考虑岩浆结晶分异(特别是斜长石)作用的影响.

(3) 四合屯义县组安山岩具有与晚侏罗世兴隆沟组火山岩相似的矿物学和地球化学特征, 表明具有相似的成因, 它们代表了华北克拉通中生代加厚的榴辉岩下地壳与岩石圈地幔一同拆沉进入软流圈, 随后榴辉岩部分熔融产生的熔体与地幔橄榄岩相互作用的结果. 但与兴隆沟组火山岩相比, 四合屯安山岩岩浆源区中含有更多 Nd 同位素组成演化的古老陆壳物质. 四合屯义县组的年龄为 120~130 Ma, 这表明拆沉作用一直延续至早白垩世.

致谢 2002 年野外工作期间得到朱日祥和潘永信的帮助; 样品的处理和测试得到西北大学大陆动力学实验室王建其和刘焯的帮助, 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 1 Chen P J, Dong Z M, Zhen S N. An exceptionally well preserved dinosaur from the Yixian Formation of China. *Nature*, 1998, 391: 147~152[DOI]
- 2 Ji Q, Luo Z X, Ji S A. A Chinese triconodont mammals and mosaic evolution of the mammalian skeleton. *Nature*, 1999, 398: 326~330[DOI]
- 3 Hou L H, Zhou Z H, Martin C D, et al. A beaked bird from the Jurassic of China. *Nature*, 1995, 377: 616~618[DOI]
- 4 季强, 等. 中国辽西中生代热河生物群. 北京: 地质出版社, 2004. 1~375
- 5 Swisher C C, Wang Y Q, Wang X L, et al. Cretaceous Age for the feathered dinosaurs of Liaoning, China. *Nature*, 1999, 400: 58~61[DOI]
- 6 Swisher C C, 汪筱林, 周忠和, 等. 义县组同位素年代新证据及土城子组 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定. *科学通报*, 2001, 46(23): 2009~2012[摘要][DPF]
- 7 王松年, 王元青, 胡光华, 等. 辽西四合屯脊椎动物生存时代: 锆石U-Pb年龄证据. *科学通报*, 2001, 46(4): 330~333[摘要][DPF]
- 8 王松年, 胡光华, 李佩贤, 等. 再论辽西四合屯脊椎动物生存时代: Ar-Ar 年龄证据. *岩石学报*, 2001, 17(4): 663~668
- 9 潘永信, 朱日祥, Show J, 等. 辽西四合屯含化石层古地磁极性年龄的初步确定. *科学通报*, 2001, 46(4): 680~684[摘要][DPF]
- 10 彭艳东, 张立东, 张快捷, 等. 辽西义县组火山岩的K-Ar、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法同位素年龄测定. *地球化学*, 2003, 32(5): 427~435
- 11 朱日祥, 邵济安, 潘永信, 等. 辽西白垩纪火山岩古地磁测定与陆内旋转运动. *科学通报*, 2002, 47(17): 1335~1340[摘要][DPF]
- 12 张宏, 王五力. 辽西北票和义县地区义县组综合对比研究. 地

- 质通报, 2004, 23(8): 766~777
- 13 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989. 521~543
- 14 史卜庆, 吴智平, 周瑶琪, 等. 辽西地区中生代义县旋回火山活动特征分析. 高校地质学报, 1998, 4(4): 413~422
- 15 彭艳东, 张立东, 张长捷, 等. 辽西义县旋回火山岩的稀土元素特征. 西北地质, 2003, 36(2): 35~42
- 16 王根厚, 张长厚. 辽西地区中生代构造格局及其形成演化. 现代地质, 2001, 15(1): 1~7
- 17 Runick R, Gao S, Ling W L, et al. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton. *Lithos*, 2004, 77: 609~637
- 18 Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 2004, 432: 892~897[DOI]
- 19 Defant M, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 1990, 347: 662~665[DOI]
- 20 Defant M J, Kepezhinskas P M. Evidence suggests slab melting. *EOS*, 2001, 82: 65~69
- 21 Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 1999, 46: 411~419
- 22 Ryuichi Shinjo. Geochemistry of high Mg andesites and the tectonic evolution of the Okinawa Trough-Ryukyu arc system. *Chemical Geology*, 1999, 157: 69~88[DOI]
- 23 赵振华. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社, 1997. 24~55
- 24 Dunn T, Sen C. Mineral/Matrix partition-coefficients for orthopyroxene, plagioclase, and olivine in basaltic to andesitic systems—a combined analytical and experimental study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(2): 717~733[DOI]
- 25 Nielsen R L, Gallahan W E, Newberger F. Experimentally determined mineral-melt partition coefficients for Sc, Y and REE for olivine, orthopyroxene, pigeonite, magnetite and ilmenite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1992, 110: 488~499[DOI]
- 26 Ewart A, Griffin W L. Application of Proton-Microprobe Data to Trace-Element Partitioning in Volcanic-Rocks. *Chemical Geology*, 1994, 117(1-4): 251~284 [DOI]
- 27 Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*, 1985
- 28 Taylor S R, McLennan S M. *The Geochemical Evolution of the Continental Crust*. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241~265[DOI]
- 29 Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in east China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 1959~1975[DOI]
- 30 Kushiro I. Melting of hydrous upper mantle and possible generation of andesitic magma: an approach from synthetic systems. *Earth Planet Sci Lett*, 1974, 22: 294~299
- 31 Tatsumi Y. Origin of high-magnesian andesites in the Setouchi volcanic belt, southwest Japan: II. Melting phase relations at high pressures. *Earth Planet Sci Lett*, 1982, 60: 305~317[DOI]
- 32 Hirose K. Melting experiments on lherzolite KLB-1 under hydrous conditions and generation of high-magnesian andesitic melts. *Geology*, 1997, 25: 42~44[DOI]
- 33 Kelemen P B. Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma: I. Phase relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite. *J Petrol*, 1990, 31: 51~98
- 34 Kelemen P B. Genesis of high Mg andesites and the continental crust. *Contrib Miner Petrol*, 1995, 120: 1~19
- 35 Yagodinski G M, Volynets O N, Koloskov A V, et al. Magnesian andesites and the subduction component in a strongly calc-alkaline series at PiipVolcano, far western Aleutians. *J Petrol*, 1994, 35: 163~204
- 36 Stern C R, Kilian R. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contrib Miner Petrol*, 1996, 123: 263~281[DOI]
- 37 Petford N, Atherton, M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru. *J Petrol*, 1996, 37: 1491~1521
- 38 Kay R W, Kay S M. Andean adakites: three ways to make them. *Acta Petrol Sinica*, 2002, 18: 303~311
- 39 Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 1993, 219: 177~189[DOI]
- 40 Xu J F, Shinjo R, Defant M C, et al. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 2002, 30: 1111~1114 [DOI]
- 41 Rapp R B, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J Petrol*, 1995, 36: 891~931
- 42 Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chem Geol*, 1999, 160: 335~356 [DOI]
- 43 Foley S, Tiepolo M, Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 2002, 417: 837~840[DOI]
- 44 Grove T L, Linda T, Elkins-Tanton L T, et al. Fractional crystallization and mantle melting controls on calc-alkaline differentiation trends. *Contrib Mineral Petrol*, 2003, DOI 10.1007/s00410-003-0448-z