

## 冀东迁安迁西群含铁变质岩系中的 辉石及其与铁矿的成因联系

李凤月 宋复梅

(首钢地质勘查院, 北京 100041)

**主题词:** 冀东迁安 迁西群 含铁变质岩系 辉石 铁矿

**提 要:** 本文对冀东迁安麻粒岩及有关岩石中的辉石进行了研究, 结果表明: 辉石的含铁度明显受寄主岩石化学成分的制约, 寄主岩石的  $\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$  和  $\langle \text{FeO} \rangle = (\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 0.8999 + \text{FeO})$  值愈高, 辉石的含铁度也愈高; 共存辉石对的  $\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}$  分配系数 ( $K_D$ ) 不仅受结晶温压条件控制, 同时也受辉石其它成分的影响。但  $\text{Ca}-\text{Mg}-\text{Fe}$  三角图解等资料研究表明: 共存的二辉石对是平衡结晶的产物, 其  $K_D$  平均值也符合张儒媛等<sup>[1]</sup> 统计的变质辉石平均值为 1.85 的规律。通过二辉石温度计计算和矿物共生组合等资料的分析, 得出辉石形成的温度为  $869 \pm 60^\circ\text{C}$ 、压力为  $5 \times 10^8 - 9 \times 10^8 \text{ Pa}$ 。本区与铁矿体成过渡关系的辉石岩全铁含量与工业铁矿大致相等, 铁矿的成因与其有着非常密切的关系。

冀东迁安地区的早太古代迁西群结晶基底构成一个以迁安县城为中心的古穹窿, 古穹窿中心主要由重熔型混合花岗岩和英云闪长岩组成。穹窿的边缘为褶皱带, 出露的岩石主要有超铁镁质岩、斜长辉石岩、紫苏麻粒岩、紫苏黑云变粒岩、片麻岩及辉石磁铁石英岩等。其原岩为一套中基性(夹超铁镁质)火山岩及火山碎屑岩-沉凝灰岩-沉积岩系。区内广泛发育多期钾质花岗岩。

冀东迁安铁矿便分布在古穹窿西南缘的褶皱带上, 多年来广大地质工作者对麻粒岩相的矿物学做了一些研究工作, 尤其对标志性矿物——辉石研究得较多<sup>[1, 2]</sup>。本文在前人工作的基础上提供了迁安矿区14个斜方辉石和11个单斜辉石的化学分析资料, 综合分析了该

表 1 迁安地区麻粒岩及有

Table 1. Chemical composition of pyroxene from

| 组 分                            | A 025—4 |       | B 224   |        | A 015—1* |        | Rz 08   |        | A 019—2* |       | A 036—1* |        |
|--------------------------------|---------|-------|---------|--------|----------|--------|---------|--------|----------|-------|----------|--------|
|                                | 角闪二辉石岩  |       | 角闪二辉麻粒岩 |        | 角闪二辉麻粒岩  |        | 角闪二辉麻粒岩 |        | 角闪二辉麻粒岩  |       | 混合岩      |        |
| SiO <sub>2</sub>               | 49.75   |       | 47.00   |        | 49.45    |        | 60.40   |        | 50.38    |       | 50.30    |        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.59    |       | 0.56    |        | 0.76     |        | 0.58    |        | 0.77     |       | 0.75     |        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.50    |       | 11.75   |        | 14.80    |        | 15.25   |        | 14.15    |       | 15.60    |        |
| <FeO>                          | 12.16   |       | 19.56   |        | 10.28    |        | 6.75    |        | 11.84    |       | 10.49    |        |
| <FeO>/MgO                      | 0.68    |       | 2.68    |        | 1.47     |        | 1.50    |        | 1.69     |       | 1.44     |        |
| CaO                            | 11.85   |       | 9.40    |        | 10.94    |        | 6.59    |        | 10.00    |       | 9.90     |        |
| MnO                            | 0.35    |       | 0.41    |        | 0.25     |        | 0.16    |        | 0.24     |       | 0.19     |        |
|                                |         |       |         |        |          |        |         |        |          |       |          |        |
|                                | Opx     | Cpx   | Opx     | Cpx    | Opx      | Cpx    | Opx     | Cpx    | Opx      | Cpx   | Opx      | Cpx    |
| SiO <sub>2</sub>               | 52.50   | 53.40 | 52.54   | 52.48  | 51.20    | 50.40  | 50.73   | 52.78  | 51.00    | 52.00 | 50.00    | 50.40  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.10    | 0.21  | 0.05    | 0.22   | 0.20     | 0.20   |         | 0.11   | 0.04     | 0.17  | 0.11     | 0.19   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.58    | 2.60  | 0.98    | 2.13   | 1.55     | 2.05   | 0.91    | 1.12   | 1.70     | 2.30  | 1.70     | 1.90   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.97    | 1.13  | 4.16    | 3.77   | 2.06     | 2.02   | 3.63    | 2.09   | 1.64     | 1.35  | 1.69     | 1.80   |
| FeO                            | 16.74   | 5.42  | 23.95   | 8.05   | 23.81    | 8.34   | 24.63   | 9.01   | 25.26    | 10.54 | 24.24    | 8.26   |
| MnO                            | 0.58    | 0.28  | 0.74    | 0.25   | 0.70     | 0.28   | 0.89    | 0.33   | 0.60     | 0.30  | 0.68     | 0.28   |
| MgO                            | 24.24   | 14.54 | 16.50   | 11.48  | 17.80    | 13.04  | 19.26   | 13.54  | 16.98    | 11.96 | 18.10    | 13.20  |
| CaO                            | 1.00    | 21.20 | 0.67    | 23.14  | 1.46     | 21.52  | 0.42    | 22.31  | 1.46     | 19.34 | 1.96     | 22.00  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.14    | 0.10  | 0.03    | 0.50   | 0.26     | 0.56   |         | 0.25   | 0.04     | 0.46  | 0.16     | 0.50   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.06    | 0.18  |         |        | 0.12     | 0.08   |         |        | 0.06     | 0.06  |          | 0.04   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |         |       |         |        | 0.20     |        |         |        |          |       |          |        |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |         |       | 0.05    |        |          |        |         |        |          |       |          |        |
| 烧失量                            |         |       |         |        | 0.69     | 1.54   |         |        | 0.99     | 0.80  | 1.84     | 1.76   |
| 总 计                            | 97.91   | 99.36 | 99.67   | 102.02 | 99.90    | 100.03 | 100.47  | 101.57 | 99.67    | 99.28 | 100.54   | 100.33 |
| 六 个 氧 为 基                      |         |       |         |        |          |        |         |        |          |       |          |        |
| Si                             | 1.958   | 1.970 | 2.015   | 1.889  | 1.961    | 1.923  | 1.928   | 1.952  | 1.963    | 1.976 | 1.933    | 1.921  |
| Ti                             | 0.003   | 0.006 | 0.002   | 0.006  | 0.006    | 0.006  |         | 0.003  | 0.001    | 0.005 | 0.005    | 0.005  |
| Al <sup>IV</sup>               | 0.042   | 0.030 |         | 0.111  | 0.039    | 0.077  | 0.041   | 0.048  | 0.037    | 0.024 | 0.067    | 0.079  |
| Al <sup>VI</sup>               | 0.027   | 0.083 | 0.092   | 0.066  | 0.031    | 0.015  |         | 0.001  | 0.040    | 0.101 | 0.010    | 0.007  |
| Fe <sup>3+</sup>               | 0.027   | 0.113 | 0.120   | 0.102  | 0.059    | 0.058  | 0.104   | 0.058  | 0.048    | 0.039 | 0.043    | 0.052  |
| Fe <sup>2+</sup>               | 0.521   | 0.167 | 0.768   | 0.242  | 0.763    | 0.266  | 0.782   | 0.279  | 0.814    | 0.334 | 0.784    | 0.263  |
| Mn                             | 0.018   | 0.009 | 0.023   | 0.009  | 0.023    | 0.009  | 0.029   | 0.010  | 0.200    | 0.010 | 0.022    | 0.069  |
| Mg                             | 1.347   | 0.799 | 0.943   | 0.616  | 1.016    | 0.741  | 1.090   | 0.716  | 0.977    | 0.677 | 1.043    | 0.758  |
| Ca                             | 0.040   | 0.838 | 0.030   | 0.890  | 0.060    | 0.880  | 0.017   | 0.884  | 0.060    | 0.787 | 0.081    | 0.889  |
| Na                             | 0.010   | 0.029 | 0.005   | 0.069  | 0.019    | 0.041  |         | 0.018  | 0.003    | 0.034 | 0.012    | 0.037  |
| K                              | 0.003   | 0.008 |         |        | 0.006    | 0.004  |         |        | 0.003    | 0.003 | 0.003    | 0.002  |
| P                              |         |       |         |        |          |        |         |        |          |       |          |        |
| Cr                             |         |       | 0.001   |        |          |        |         |        |          |       |          |        |
| f                              | 30      | 27    | 49      | 36     | 45       | 31     | 46      | 32     | 52       | 36    | 45       | 30     |

注: Opx 代表斜方辉石系列; Cpx 代表单斜辉石系列

岩石化学全分析为本单位中心实验室完成; 矿物分析为地科院矿床所电子探针室陈克樵完成;

其中带 \* 样品为本单位中心实验室分析

## 关岩石的辉石化学成分

granulite and its related rocks in Qianan area

| A 038—5* | ZK 8705—21—4 | B 044—4* | 羊—1*    | B 33    | B 118   | ZK 8703<br>—43 | ZK 8705<br>—1 |
|----------|--------------|----------|---------|---------|---------|----------------|---------------|
| 混合岩      | 辉石磁铁石英岩      | 辉石磁铁石英岩  | 磁铁石英辉石岩 | 磁铁石英辉石岩 | 磁铁石英辉石岩 | 石英磁铁辉石岩        | 磁铁石英辉石岩       |
| 73.20    | 49.90        | 68.85    | 51.20   | 51.98   | 48.15   | 42.65          | 43.75         |
| 0.37     | 0.08         | 0.06     | 0.008   | 0.02    | 0.01    | 0.11           | 0.04          |
| 12.35    | 1.00         | 0.72     | 0.30    | 0.52    | 1.20    | 0.50           | 0.75          |
| 4.19     | 37.78        | 18.71    | 41.01   | 39.22   | 41.04   | 46.91          | 39.75         |
| 4.71     | 9.94         | 3.06     | 10.51   | 12.65   | 28.30   | 11.55          | 7.43          |
| 3.34     | 3.60         | 3.40     | 1.32    | 1.87    | 1.47    | 4.06           | 2.33          |
| 0.09     | 0.33         | 0.20     | 0.11    | 0.17    | 0.25    | 0.85           | 0.38          |

| Opx   | Cpx   | Opx   | Cpx    | Opx   | Cpx   | Opx   | Cpx    | Opx   | Cpx    | Opx    | Opx    | Opx   |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 52.00 | 51.90 | 50.29 | 51.20  | 51.10 | 52.45 | 52.25 | 54.05  | 49.21 | 53.50  | 49.12  | 46.59  | 47.64 |
| 0.13  | 0.13  | 0.06  | 0.07   | 0.15  | 0.15  | 0.002 | 0.001  | 0.34  |        | 0.19   |        |       |
| 1.35  | 1.90  | 3.10  | 2.02   | 0.55  | 1.35  | 0.27  | 0.30   | 0.08  | 0.43   | 0.37   | 0.50   | 0.61  |
| 1.27  | 1.16  |       |        | 0.80  | 1.62  | 2.85  | 1.60   | 12.09 | 4.27   | 1.69   | 1.53   | 0.64  |
| 16.46 | 5.50  | 28.80 | 10.51  | 31.52 | 12.90 | 33.76 | 16.26  | 29.00 | 10.07  | 42.23  | 46.71  | 41.03 |
| 0.42  | 0.18  | 1.01  | 0.42   | 0.62  | 0.26  | 0.23  | 0.16   | 0.21  | 0.09   | 0.16   | 0.52   | 0.84  |
| 24.72 | 15.44 | 14.94 | 12.08  | 13.32 | 10.40 | 8.60  | 9.20   | 5.97  | 7.73   | 6.74   | 3.90   | 7.59  |
| 1.20  | 20.86 | 0.78  | 20.20  | 1.09  | 18.54 | 1.80  | 18.60  | 0.27  | 18.18  | 0.49   | 0.43   | 1.09  |
| 0.008 | 0.44  | 0.22  | 0.33   | 0.07  | 0.46  | 0.03  | 0.20   | 0.003 | 0.33   | 0.06   |        |       |
| 0.04  | 0.04  |       | 0      | 0.03  | 0.07  |       | 0.02   |       |        |        |        |       |
|       |       |       | 0      |       |       | 0.02  | 0.011  |       |        |        |        |       |
|       |       | 0.09  | 0.07   | 0.70  | 0.63  |       |        |       |        |        |        | 0.52  |
| 1.45  | 1.46  |       |        |       |       |       |        |       |        |        |        |       |
| 99.12 | 99.01 | 99.29 | 100.90 | 99.93 | 98.83 | 99.81 | 100.41 | 97.17 | 100.65 | 101.05 | 100.18 | 99.96 |

础 的 阳 离 子 数

|       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.945 | 1.956 | 1.954 | 1.939 | 2.014 | 2.015 | 2.072 | 2.053 | 2.117 | 2.064 | 2.007 | 1.981 | 1.971 |
| 0.004 | 0.004 | 0.044 | 0.002 | 0.034 | 0.004 |       |       | 0.010 |       | 0.007 |       |       |
| 0.055 | 0.044 | 0.046 | 0.061 |       |       |       |       |       |       |       | 0.013 | 0.019 |
| 0.005 | 0.040 | 0.044 | 0.030 | 0.026 | 0.061 | 0.012 | 0.013 | 0.010 | 0.046 | 0.039 |       | 0.011 |
| 0.036 | 0.033 |       | 0.015 | 0.024 | 0.041 | 0.084 | 0.046 | 0.393 | 0.212 | 0.052 | 0.049 | 0.020 |
| 0.515 | 0.173 | 0.936 | 0.381 | 1.039 | 0.414 | 1.117 | 0.516 | 1.047 | 0.566 | 1.442 | 1.660 | 1.417 |
| 0.013 | 0.006 | 0.033 | 0.014 | 0.021 | 0.008 | 0.007 | 0.005 | 0.008 | 0.002 | 0.005 | 0.020 | 0.029 |
| 1.379 | 0.867 | 0.861 | 0.680 | 0.782 | 0.595 | 0.503 | 0.521 | 0.383 | 0.443 | 0.407 | 0.247 | 0.468 |
| 0.048 | 0.842 | 0.033 | 0.818 | 0.046 | 0.763 | 0.076 | 0.757 | 0.129 | 0.751 | 0.022 | 0.020 | 0.048 |
| 0.006 | 0.032 | 0.014 | 0.023 | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.015 | 0.155 | 0.051 | 0.015 |       |       |
| 0.002 | 0.002 |       |       | 0.002 | 0.034 |       | 0.001 |       |       |       |       |       |
|       |       | 0.005 |       |       |       | 0.002 | 0.001 |       |       |       |       | 0.017 |
| 29    | 20    | 53    | 41    | 58    | 44    | 70    | 52    | 79    | 56    | 79    | 86    | 76    |

区辉石的成分特点, 形成条件及其与铁矿的成因联系。

## 1 辉石的化学成分

本区研究的 14 个斜方辉石和 11 个单斜辉石的化学成分列于表 1。从表中可以看出辉石的含铁度 ( $f = \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn} / \text{Mg} + \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}$ ) 明显地受寄主岩石化学成分所制约, 一般寄主岩石的  $(\text{FeO}) / \text{MgO}$  和  $(\text{FeO}) = (\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 0.8999 + \text{FeO})$  值愈高, 其辉石的含铁度 ( $f$ ) 值也愈高。富镁的古铜辉石和次透辉石产在麻粒岩的小夹层科马提岩中; 富铁的易熔石和铁普通辉石产在与铁矿层呈过渡关系的磁铁石英辉石岩或含铁辉石岩中。

本区的斜方辉石含铁度 ( $f_{\text{Opx}}$ ) 为 29—86, 变化范围较大, 但多集中在 30—60, 主要为紫苏辉石、铁紫苏辉石及易熔石。

单斜辉石的含铁度 ( $f_{\text{Cpx}}$ ) 为 20—56, 主要为次透辉石、普通辉石和少量的铁普通辉石。一般  $\text{Na}_2\text{O}$  含量较低 (小于 0.30%), 指示其形成于压力不高的条件下。

## 2 共存辉石对的 $\text{Fe}^{2+}$ —Mg 分配

共存二辉石之间  $\text{Fe}^{2+}$ —Mg 分配的研究, 愈来愈受到研究者的重视。一把其分配系数  $K_D$  定义为  $K_{D_{\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}}}^{\text{A-B}} = X_{\text{Fe}^{2+}}^{\text{A}} / (1 - X_{\text{Fe}^{2+}}^{\text{A}}) / X_{\text{Fe}^{2+}}^{\text{B}} / (1 - X_{\text{Fe}^{2+}}^{\text{B}})$ , 式中  $X_{\text{Fe}^{2+}}$  为矿物 A 和 B 中  $\text{Fe}^{2+}$  的克分子分数, 即  $X_{\text{Fe}^{2+}} = \text{Fe}^{2+} / \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$ , 因此, 上式可简化为:  $K_{D_{\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}}}^{\text{A-B}} = (\text{Fe}^{2+} / \text{Mg})^{\text{A}} / (\text{Fe}^{2+} / \text{Mg})^{\text{B}}$ 。并认为在特定的平衡条件下, 分配系数  $K_D$  值随结晶的温压变化而变化, 而与共存矿物本身的  $\text{Fe}^{2+} / \text{Mg}$  值无关<sup>[1]</sup>。但是, 一些研究者认为,  $K_D$  值除受结晶作用的 P—T 条件控制外, 还受辉石中其它组分特别是 Ca、Al<sup>IV</sup> 和  $\text{Fe}^{2+} / \text{Mg}$  值的影响<sup>[2]</sup>。笔者研究的结果与后者一致。

将研究的 11 对二辉石中的  $\text{Fe}^{2+} / \text{Mg}$  值投点于图 1, 呈良好的线性关系。按  $K_D = (\text{Fe}^{2+} / \text{Mg})^{\text{Opx}} / (\text{Fe}^{2+} / \text{Mg})^{\text{Cpx}}$  计算, 结果列于表 2。从表 2 可见:  $K_D$  值变化范围为

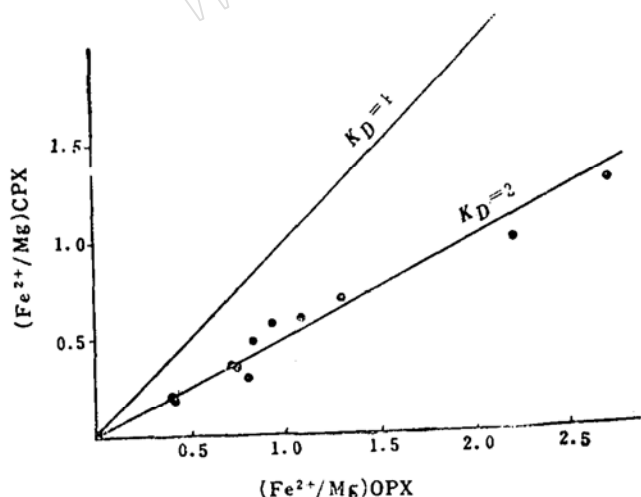


图 1 共生的 Opx 和 Cpx 之间  $\text{Fe}^{2+} / \text{Mg}$  的分配关系  
Fig. 1.  $\text{Fe}^{2+} / \text{Mg}$  partition relation of associated Opx and Cpx

1.62—2.67, 平均 2.02。说明本区共存的二辉石对的  $K_D$  值是比较接近的, 其中  $\text{Fe}^{2+} / \text{Mg}$  值的大小表现出对  $K_D$  值有一定的影响。

尽管辉石本身的  $\text{Fe}^{2+} / \text{Mg}$  值对  $K_D$  值有影响, 但研究区麻粒岩相变质作用形成的各类岩石中的共存辉石对, 其辉石本身的  $\text{Fe}^{2+} / \text{Mg}$  值变化范围很宽, 而它们的  $K_D$  值变化范围都较窄, 而且与印度马德拉斯和康达帕利澳大利亚奎雷丁和布洛肯山较高级麻粒岩中二辉石的  $K_D$  值接近<sup>[2]</sup>。这一事实充分说明  $K_{D_{\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}}}^{\text{Opx-Cpx}}$  值仍可作为辉石形成时 P—T 条件的标志, 并

据张儒媛和靳是琴<sup>[1-2]</sup>提出的  $K_{D_{\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}}}^{\text{Opx-Cpx}}$  值大体上有这样的统计规律: 变质成因的辉石平

表 2 迁安地区麻粒岩及有关岩石共存辉石对的  $K_D(\text{Fe})$  值Table 2.  $K_D(\text{Fe}^{2+})$  values of coexisting clinopyroxene and orthopyroxene from granulite and its related rocks in Qianan area

| 岩石名称                                      | 磁铁(或含磁铁)石英辉石岩 |      | 辉石磁铁石英岩          |         | 角闪二辉麻粒岩 |         |       |         | 角闪二辉石岩  | 混合岩     |         |
|-------------------------------------------|---------------|------|------------------|---------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|
| 样 号                                       | 羊—1           | B 33 | ZK 8705<br>-21-4 | B 044-4 | B 224   | A 015-1 | Rz 08 | A 019-2 | A 025-4 | A 036-1 | A 038-5 |
| $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{Opx}}$ | 2.20          | 2.74 | 1.10             | 1.30    | 0.94    | 0.75    | 0.72  | 0.83    | 0.39    | 0.80    | 0.40    |
| $(\text{Fe}^{2+}/\text{Mg})_{\text{Cpx}}$ | 0.99          | 1.28 | 0.60             | 0.70    | 0.58    | 0.36    | 0.37  | 0.49    | 0.21    | 0.30    | 0.20    |
| $K_{D(\text{Fe}^{2+})}^{\text{Opx-Cpx}}$  | 2.22          | 2.14 | 1.83             | 1.91    | 1.62    | 2.08    | 1.95  | 1.69    | 2.13    | 2.67    | 2.00    |

均为 1.85；岩浆缓慢结晶的辉石平均为 1.37；快速冷却结晶的辉石平均为 1。说明本区辉石  $K_D$  值可作为变质作用 P—T 条件的标志。

在  $\text{Ca—Mg—}(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn})$  三角图解中, 本区麻粒岩及有关岩石中单斜辉石的投影点, 基本沿 Binns<sup>[1]</sup> 的麻粒岩单斜辉石趋势线分布 (图 2)。共存的斜方辉石和单斜辉石中, 斜方辉石更富铁。这是深成的火成岩和变质岩中共存辉石对的共性, 说明它们是平衡结晶的产物<sup>[1]</sup>。共存辉石的连线在 Wo—En 连结线上的交点位置是: 辉石磁铁石英岩  $\text{Wo}=73—75$ ; 角闪二辉石岩  $\text{Wo}=85$ ; 混合岩  $\text{Wo}=70—75$ ; 磁铁石英辉石岩  $\text{Wo}=75—90$ 。关于这种交点位置的结晶化学或成因岩石学的含义, 一直存在不同的看法, 笔者结合本区实际情况认为, 这种交点位置向 Mg 端员迁移, 说明了它们结晶的温度升高、压力降低, 或者受混合岩化作用所致。

### 3 共存辉石对平衡结晶的条件

辉石成分的特点, 提供了形成条件的信息, 而共存二辉石对之间元素的分配则可半定量地估算其形成时的温度。

本区二辉石地质温度计所计算的温度无疑是麻粒岩相变质高峰温度的记录, 然而由于

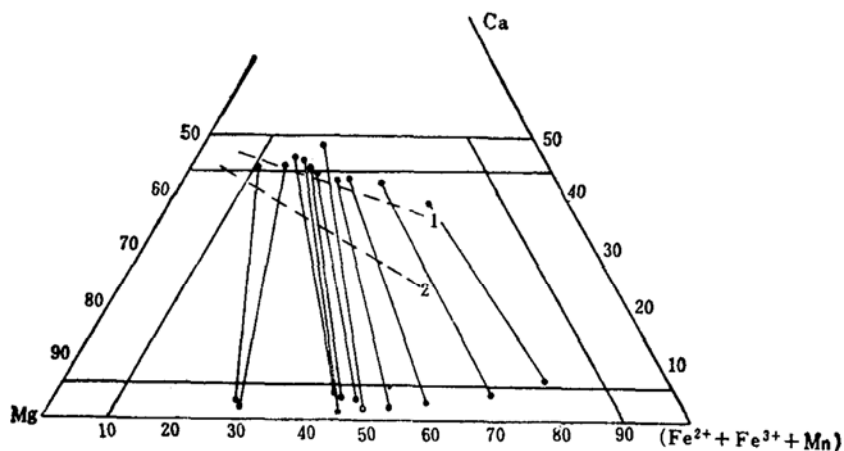


图 2 辉石的  $\text{Ca—Mg—}(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn})$  三角图解  
Fig. 2.  $\text{Ca—Mg—}(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn})$  triangular diagram of pyroxene

在计算其分配系数和温度时所采用的公式不同, 所得温度亦不同, 这是国内目前在讨论成岩温度方面产生显著分歧的主要原因之一。本文采用了伍德和坂野 (B. J. Wood and S. Banno) 1973 年、尼赫鲁 (E. Nehru) 和威利 (J. Wyllie) 1974 年<sup>[3]</sup> 的公式对 11 对辉石进行了计算, 以  $T_1$ 、 $T_2$  表示, 结果见表 3。

表 3 二辉石温度计计算的温度

Table 3. Temperatures calculated with clinopyroxene-orthopyroxene thermograph

| 序 号 | 样 号                      | $a_{\text{MgSiO}_3}^{\text{Cpx}}$ | $a_{\text{MgSiO}_3}^{\text{Opx}}$ | $x_{\text{Fe}}^{\text{Opx}}$ | $T_1$ (°C) | $T_2$ (°C) |
|-----|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------|------------|
| 1   | A 025—4                  | 0.067                             | 0.437                             | 0.279                        | 961        | 843        |
| 2   | B 224                    | 0.031                             | 0.224                             | 0.449                        | 832        | 728        |
| 3   | A 015—1                  | 0.045                             | 0.242                             | 0.430                        | 827        | 800        |
| 4   | Rz 08                    | 0.040                             | 0.288                             | 0.418                        | 835        | 742        |
| 5   | A 019—2                  | 0.053                             | 0.243                             | 0.454                        | 886        | 825        |
| 6   | A 036—1                  | 0.033                             | 0.270                             | 0.429                        | 828        | 712        |
| 7   | A 038—5                  | 0.075                             | 0.472                             | 0.272                        | 966        | 855        |
| 8   | ZK 8705 <sup>-21-4</sup> | 0.088                             | 0.189                             | 0.521                        | 895        | 875        |
| 9   | B 044—4                  | 0.051                             | 0.159                             | 0.571                        | 881        | 870        |
| 10  | 羊—1                      | 0.040                             | 0.079                             | 0.687                        | 895        | 884        |
| 11  | B 33                     | 0.025                             | 0.042                             | 0.732                        | 756        | 739        |
| 平 均 |                          |                                   |                                   |                              | 869        | 807        |

\*  $T_1$  为用 Wood—Banno (1973) 公式计算结果

\*\*  $T_2$  为用 Nehru—Wyllie (1974) 公式计算结果

根据前人研究结果表明: 伍德和坂野提出的适用于天然含铁复杂体系的二辉石温度计的计算公式, 对富镁的二辉石对计算偏高 100°C, 对富铁的二辉石对计算偏低。经校正比较, 表明伍德和坂野的公式是比较好的。

由表 3 可见, 本区二辉石对虽然取自不同的母岩, 但用这两种方法计算的结果大体是类似的, 其中按尼赫鲁 (E. Nehru) 和威利 (J. Wyllie) 的公式计算的结果偏低, 但误差大部分不超过 100°C。按伍德和坂野方法计算的结果为  $869^\circ \pm 60^\circ\text{C}$ , 其与张儒媛等对迁西太平寨麻粒岩的计算结果 ( $850^\circ \pm 60^\circ\text{C}$ ) 及靳是琴对迁安地区麻粒岩的计算结果 ( $884^\circ \pm 60^\circ\text{C}$ ) 是基本相同的。参照宾斯 (R. A. Binns, 1969)<sup>[4]</sup> 角闪石 + 石英的分解温度, 当压力超过  $5 \times 10^8 \text{ Pa}$  时, 温度应超过 800°C。因此, 笔者认为按伍德和坂野的公式计算的温度是基本符合本区实际的。

根据中基性麻粒岩矿物共生的基本特征, 即斜方辉石 + 单斜辉石 + 斜长石 + 石英, 除个别  $\text{SiO}_2$  不饱和或高度富铁的岩石之外, 一般不含石榴石, 说明麻粒岩形成的压力较低。按格林和伍德 1967 年的实验, 在 900°C 的温度下, 其压力应不超过  $12 \times 10^8 \text{ Pa}$ <sup>[4]</sup>。

本区产出的辉石中斜方辉石占多数, 斜方辉石形成的温度和压力区间都较窄, 特别是温度, 其仅出现在高温岩石中。单斜辉石一般为次透辉石、铁次透辉石、铁普通辉石, 而无富钠富铝的单斜辉石。这些都反映了辉石形成压力较低的特征。另外, 在辉石中普遍含微量钛, 据 Onuma 和 yagi 等人<sup>[5]</sup> 的研究结果, 钛辉石分子的含量随压力的增大而递减, 当压力大于 10 Pa 时, 钛辉石分子则不出现。说明本区辉石生成压力较低。在与铁铝榴石、矽线石和石英共存时, 据柯里 (K. L. Currie, 1977)<sup>[4]</sup> 的研究结果在 900°C 温度下,

压力不超过  $9 \times 10^8$  Pa。

综合上述资料分析,本区辉石的形成温度为  $869^\circ \pm 60^\circ$ , 压力应为  $5 \times 10^8$  Pa— $9 \times 10^8$  Pa, 它代表了迁安地区早太古代早期麻粒岩相变质作用的温压条件, 说明当时的古地热梯度接近而不超过  $30^\circ\text{C}/\text{km}$ 。按都城秋穗关于麻粒岩相划分的观点, 本区属于麻粒岩中压亚相。

## 4 辉石与磁铁矿的成因关系

辉石磁铁矿石岩是本区最主要的代表性铁矿石类型, 其中辉石又是铁矿石中主要的组成矿物。因此, 研究辉石的种属、含量和成因对研究铁矿的成因有决定性意义。

### 4.1 辉石的产状及其特征

在迁安矿区东西矿带均发现矿体与辉石岩(或石英辉石岩)沿走向和倾向有相变过渡关系。地表出露辉石岩(或石英辉石岩)的层位, 地下可以变为辉石磁铁矿石岩(铁矿层); 地表出露的铁矿层, 地下可变为以辉石岩为主。孟家沟铁矿床几乎每层铁矿之中均有辉石岩, 它们在产状上与铁矿体的关系错综复杂。这种并不限于矿体底部, 大部分成似层状, 少量成透镜状和扁豆状的辉石岩(或石英辉石岩)中, 其辉石主要是含铁度较高的铁紫苏辉石或易熔石(费氏台测得  $(-2V)=84^\circ$ ), 其折光率  $N_p'=1.7341$ 、 $N_g'=1.7380$  (油浸法), 多色性极显著, 底切面近于垂直的解理极清楚。随着辉石岩中磁铁矿含量的增加, 斜方辉石的多色性有减弱之势。辉石岩最常见的矿物组合为斜方辉石+单斜辉石+石英±磁铁矿。

### 4.2 辉石岩富铁程度与铁矿体相当

本区与铁矿体成过渡关系的辉石岩, 其辉石组分主要为富铁的铁紫苏辉石和易熔石。辉石岩中的磁铁矿含量比例有变化, 其亚铁、全铁的比例亦随之而变。辉石岩全岩的总铁量较高(见表4), 折算为 TFe 25.49%—31.82%, 与本区铁矿石的一般 TFe 值类似。

从其产状和物质成分特征来看, 辉石岩与作为铁矿石的辉石磁铁矿石岩具有同质异相岩的特点, 应当同属于沉积变质的硅铁建造, 这与王仁民等<sup>[1]</sup>曾经论述的结果是一致的。

### 4.3 辉石与磁铁矿的成因探讨

与铁矿石成过渡关系的辉石岩, 一般是富铁和硅的饱和岩。这种岩石在各种恢复原岩的岩石化学图解上均远离岩浆区, 显然与基性超基性岩毫无关系<sup>[1]</sup>。据从柏林等<sup>[6]</sup>娄子山英榴易熔岩的 FeO (全铁) 高达 30—50 % 以及巴西报导的近代火山有“铁流”喷发以外, 绝大多数火成岩不可能有如此高的含铁量。它们应是由胶体铁硅质岩变质形成。另据靳是琴研究结果<sup>[2]</sup>, 变质的斜方辉石成分变化范围很大, 其成分主要决定于岩石的成分和它们形成时的物理化学条件(主要是温度和压力), 即大多数变质的斜方辉石成分变化范围比岩浆岩中的斜方辉石大。并考虑到本区出露的迁西群三屯营组的变质杂岩产出时代为早太古代, 其同位素年龄为 35 亿年<sup>[7-8]</sup>。在早太古代, 大气和水中严重缺氧, 海相沉积形成的辉石岩及铁矿石中未发现原生的碳酸盐矿物与硫化物, 而主要为含铁硅酸盐矿物。因此, 笔者推测早太古代海相沉积为弱还原环境, 氧逸度低、铁质氧化不充分, 在麻粒岩

① 王仁民等, 1980, 迁西群的二次变质、相系列划分与水厂式铁矿。河北地质情报, 第1期, 1—14。

表 4 辉石岩与铁矿石的化学成分对比表

Table 4. Comparison of chemical composition between pyroxenite and iron ore

|                                | B 118<br>磁铁石英<br>辉石岩 | B 33<br>磁铁石英<br>辉石岩 | B 15<br>磁铁石英<br>辉石岩 | B 268<br>石英磁铁<br>辉石岩 | B 7<br>石英磁铁<br>辉石岩 | B 213<br>铁矿石 | B 105<br>铁矿石 | B 11<br>铁矿石 | B 295<br>铁矿石 | B 275<br>铁矿石 |
|--------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 48.15                | 51.98               | 54.45               | 53.00                | 47.30              | 51.30        | 46.00        | 41.75       | 50.00        | 54.00        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.04                 | 0.02                | 0                   | 0.08                 | 0.02               | 0.05         | 0.02         | 0.04        | 0.004        | 0.004        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.20                 | 0.52                | 0.40                | 2.10                 | 0.30               | 0.90         | 0.40         | 1.25        | 2.43         | 2.50         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.47                | 20.16               | 21.39               | 12.00                | 11.37              | 20.90        | 30.99        | 28.60       | 30.40        | 25.33        |
| FeO                            | 28.92                | 21.08               | 13.37               | 25.31                | 28.56              | 18.61        | 14.44        | 17.27       | 15.03        | 11.22        |
| TFe                            | 31.82                | 30.34               | 25.49               | 28.09                | 30.00              | 28.83        | 33.89        | 33.35       | 32.94        | 26.44        |
| SFe                            | 15.76                | 22.36               | 21.95               |                      |                    | 23.45        |              |             | 32.94        | 25.66        |
| SiFe                           |                      |                     | 7.00                |                      |                    |              |              |             |              |              |
| MnO                            | 0.25                 | 0.17                | 0.39                | 0.71                 | 0.40               | 0.14         | 0.15         | 0.16        | 0.13         | 0.22         |
| MgO                            | 4.45                 | 3.10                | 4.85                | 4.55                 | 7.75               | 3.00         | 1.15         | 4.00        | 2.40         | 2.55         |
| CaO                            | 1.47                 | 1.87                | 2.60                | 0.40                 | 3.20               | 2.25         | 2.63         | 4.70        | 0.10         | 0.70         |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.11                 | 0.07                | 0                   | 0.58                 | 0.64               | 0.96         | 0.07         | 0.88        | 0.12         | 0.16         |
| K <sub>2</sub> O               | 0.06                 | 0.03                | 1.45                | 0.06                 | 0.20               | 0.10         | 0.03         | 0.14        | 0.24         | 0.24         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.05                 | 0.04                | 0.08                | 0.07                 | 0.06               | 0.05         | 0.12         | 0.07        | 0.11         | 0.08         |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 0.24                 | 0.12                | 0.92                | 0.70                 | 0.48               | 0.38         | 0            | 0.14        | 0.16         | 0.46         |
| CO <sub>2</sub>                | 0.33                 | 0.19                | 0.32                | 0.19                 | 0.16               | 0.25         | 2.53         | 0.12        | 0.19         | 2.18         |
| Σ                              | 98.74                | 99.35               | 100.22              | 99.75                | 100.44             | 98.85        | 98.53        | 99.12       | 101.31       | 99.64        |

分析者：本单位中心实验室

相的变质作用下，一部分  $\text{Fe}^{2+}$  未能形成磁铁矿而进入铁镁硅酸盐的晶格中，因此，本区硅铁建造中含有较多的辉石类矿物，进而形成以辉石为主的辉石岩类。后来的磁铁矿的成因与其具有非常密切的联系。

## 参 考 文 献

- 1 张儒媛等.冀东太平寨地区麻粒岩及有关岩石的辉石研究.地质科学, 1982, (2): 134—142.
- 2 靳是琴等.华北麻粒岩相岩石中的辉石.长春地质学院院报, 1986, (2): 29—36.
- 3 靳是琴等.成因矿物学概论.上册, 吉林大学出版社, 1984, 79—83.
- 4 王仁民等.迁安地区早太古代变质温压条件探讨.岩矿测试, 1982, 1(4): 6—10.
- 5 周鸿勋.北京密云半截峪一带太古代变质铁矿的成因矿物学.岩石矿物及测试, 1983, 2(3): 197—205.
- 6 从柏林等.冀东迁西—迁安地区早太古代变质岩系原岩恢复及其地质意义.地质科学, 1982, (2): 125—131.
- 7 江博明等.中国冀东 3500 Ma 斜长角闪岩系的野外产状岩相学 Sm—Nd 同位素年龄及地球化学.中国地质科学院院刊, 1988, (18): 1—32.
- 8 乔广生、王凯怡等.冀东早太古代岩石 Sm—Nd 同位素年龄测定.地质科学, 1987, (1): 86—91.

## Pyroxene from Ferriferous Metamorphic Rocks in Qianxi Group, Qianan County, East Hebei, and Its Genetic Relationship with Iron Ore

Li Fengyue, Song Fumei

(Academy of Geological Exploration, Capital Iron and Steel Corporation, Beijing 100041)

**Key words:** Qianan of east Hebei; Qianxi Group; Ferriferous metamorphic rocks; pyroxene; iron ore

### Abstract

Pyroxene from granulite and related rocks in Qianan County has been studied in this paper, and the results show that iron content of pyroxene is obviously governed by chemical composition of host rocks: the higher the  $(\text{FeO})/\text{MgO}$  and  $(\text{FeO}) = (\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 0.8999 + \text{FeO})$  values of host rocks, the higher the iron content of pyroxene. The  $\text{Fe}^{2+}$ -Mg distribution coefficient ( $K_D$ ) of clinopyroxene-orthopyroxene pair is not only controlled by temperature-pressure conditions of crystallization but also affected by other components of pyroxene. Nevertheless, the Ca-Mg-Fe triangular diagram indicates that the coexisting clinopyroxene and orthopyroxene are products of equilibrium crystallization with their average  $K_D$  value in accord with the law advanced by Zhang Ruyuan et al. that the average  $K_D$  value of metamorphic pyroxene is 1.85.

The calculation with the clinopyroxene-orthopyroxene thermometer and an analysis of data on mineral association show that the temperature and pressure for the formation of pyroxene are  $869 \pm 60^\circ\text{C}$  and  $5 \times 10^8 - 9 \times 10^8$  Pa respectively.

$T_{\text{Fe}}$  content of pyroxenite that shows gradual contact with the iron ore body is approximately equal to that of economic iron ore. Iron ore is genetically closely related to pyroxenite.