

# 中国电气石 (碧玺) 的颜色与成分

邹天人 杨岳清

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京 100037)

电气石 (Tourmaline) 在宝石学界常叫碧玺, 是较常见的宝石矿物。主要产于花岗伟晶岩, 少量产在富含硼的气成热液岩或交代岩。

电气石的晶体化学式为:  $(\text{Na}, \text{Ca}) \text{RAl}_6 [\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{BO}_3]_3 (\text{O}, \text{OH}, \text{F})_4$ 。R 主要为 Mg, Fe, Mn, Li, Al 等阳离子, 在电价得到补偿时,  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Cr}^{3+}$  也可进入此位置。电气石的名称、颜色和透明度受这些阳离子的组成所决定。例如: 铁电气石, R 主要为  $\text{Fe}^{2+}$  离子; 镁电气石, R 主要为  $\text{Mg}^{2+}$  离子; 锂电气石, R 主要为  $\text{Li}^+$ 、 $\text{Al}^{3+}$  离子; 钙镁电气石, 含 Na 很低, R 主要为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  离子; 钠锰电气石, R 主要为  $\text{Mn}^{2+}$  离子; 布格电气石, R 主要为  $\text{Fe}^{3+}$  离子; 铬电气石, R 主要为  $\text{Cr}^{3+}$  离子。

上列电气石中, 由于 Mg- $\text{Fe}^{2+}$  之间和  $\text{Fe}^{2+}$ - $(\text{Li}^+ \text{Al}^{3+})$  之间呈完全类质同象系列, 而 Mg- $(\text{Li}^+ \text{Al}^{3+})$  之间只能有限的替代。因此, 在镁电气石、铁电气石和锂电气石三个亚种之间常有过渡成分的电气石。

## 1 电气石的化学成分

由于宝石级电气石 (碧玺) 主要产于花岗伟晶岩, 因此, 笔者重点研究伟晶岩中的电气石。将采自中国伟晶岩其代表性的各种颜色电气石的化学成分列入表 1。由表 1 可见, 电气石的化学成分变化很大。总体上看, 主要有钙镁电气石、镁电气石、铁电气石、锂-铁电气石和锂电气石等。显然, 在上列每一种电气石内常包含有其它电气石分子, 还不同程度地包含有钠锰电气石分子和布格电气石分子。因此可以说, 电气石的化学成分是十分复杂的。如果将已获得的中国伟晶岩中产出的 38 个电气石化学成分换算成阳离子数后, 按  $\text{Li}-(\text{Mg}+\text{Ca})-(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}+\text{Mn}^{2+})$  阳离子数代表三大类电气石作图 (图 1)。由图可看出: 各类电气石与伟晶岩形成顺序和结晶温度有直接的依存关系。

1.1 镁电气石 (包括钙镁电气石) - 铁电气石 (包括布格电气石和钠锰电气石) 系列: 富含钙镁电气石或镁电气石分子的电气石仅出现在镁质大理岩的伟晶岩边部, Ca 和 Mg 来自围岩, 仅在伟晶岩浆较高温 ( $700\sim 600^\circ\text{C}$ ) 时 (早期结晶的伟晶岩) 与围岩发生同化混染作用。而对温度下降到  $550^\circ\text{C}$  后结晶的伟晶岩, 围岩 Ca、Mg 对电气石成分影响很小。总之, 镁-铁电气石系列的电气石主要分布在靠近花岗岩体的较高温 ( $700\sim 550^\circ\text{C}$ ) 结晶的二云母-微斜长石型、白云母-微斜长石型及白云母-微斜长石-钠长石型伟晶岩中。

1.2 铁电气石-锂电气石系列: 是伟晶岩产出电气石最主要的完全类质同象系列。大多数样点都靠近  $\text{Li}-(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}+\text{Mn}^{2+})$  边分布。随伟晶岩的结晶, 从早期到晚期, 成岩温度由  $700^\circ\text{C}\rightarrow 350^\circ\text{C}$ , 电气石成分中的  $(\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}^{2+})$  逐渐被  $(\text{Li}^+ + \text{Al}^{3+})$  取代, 由铁电气石 $\rightarrow$ 锂铁电气石 $\rightarrow$ 锂电气石演化。颜色从黑色 $\rightarrow$ 蓝绿、蓝、黄绿等色 $\rightarrow$ 绿、黄、红、淡绿等色。透明度也跟随着由不透明 $\rightarrow$ 半透明 $\rightarrow$ 透明。其中, 锂铁电气石主要产于白云母-钠长石-锂辉

表 1 电气石的化学成分(%)

| 名称                             | 产地     | 钙镁电气石         |               |               |       | 铁电气石          |             |             |              | 锂铁电气石 |              |         |           | 锂电气石   |        |        |  |
|--------------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|-------|---------------|-------------|-------------|--------------|-------|--------------|---------|-----------|--------|--------|--------|--|
|                                |        | 大武夷山<br>西-31# | 云南高黎贡山<br>野猪坪 | 云南高黎贡山<br>春头坪 | 武夷山   | 阿尔泰山<br>佳-83# | 内蒙阴山北<br>三庙 | 内蒙阴山北<br>角太 | 武夷山<br>西-31# | 秦岭    | 阿尔泰山<br>可-3# | 内蒙阴山北角太 | 阿尔泰山佳-83# |        |        |        |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 33.58  | 36.29         | 34.20         | 34.23         | 36.90 | 40.10         | 32.68       | 36.32       | 38.32        | 36.52 | 40.82        | 36.92   | 40.02     | 38.29  | 40.02  | 40.96  |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.04   | 0.024         | 0.43          | 0.20          | 1.22  | 0.134         |             | 0.29        | 0.032        | 0.02  | 0.064        | 0.04    | 0.016     | 0.38   | 0.016  | 0.022  |  |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 9.30   | 10.60         | 10.38         | 10.15         | 11.71 | 8.44          | 10.95       | 11.39       | 10.52        | 10.90 | 8.69         | 11.10   | 8.32      | 11.20  | 8.32   | 8.17   |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 30.50  | 35.96         | 30.49         | 32.13         | 31.64 | 36.01         | 33.21       | 34.12       | 35.27        | 37.23 | 39.85        | 35.65   | 41.41     | 36.41  | 41.41  | 41.80  |  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.92   | 0.61          | 0.54          | 2.80          | 5.07  | 8.467         | 3.47        | 3.12        | 1.63         | 4.30  | 2.95         | 1.98    | 0.48      | 0.09   | 0.48   | 0.15   |  |
| FeO                            |        | 1.34          | 13.62         | 13.09         | 6.54  | 1.83          | 9.87        | 3.28        | 5.24         |       | 0.72         | 1.99    |           | 3.46   |        |        |  |
| MnO                            | 0.05   | 0.021         | 0.31          | 0.33          | 0.214 | 0.653         | 0.88        | 1.57        | 0.15         | 3.38  | 0.78         | 2.24    | 1.20      | 1.79   | 1.20   | 0.58   |  |
| MgO                            | 8.36   | 7.50          | 5.07          | 3.89          | 2.23  | 0.55          | 0.41        |             | 0.85         | 0.32  | 0.40         |         | 0.26      |        | 0.26   | 0.22   |  |
| CaO                            | 7.37   | 0.90          | 0.32          | 0.19          | 0.49  | 0.42          | 0.45        |             | 0.25         | 0.25  | 0.40         |         | 0.41      |        | 0.41   | 0.40   |  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.69   | 3.18          | 2.09          | 1.78          | 0.83  | 2.64          | 4.72        | 3.65        | 2.68         | 1.42  | 2.23         | 3.89    | 1.90      | 3.04   | 1.90   | 1.69   |  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.33   | 0.08          | 0.07          | 0.15          | 1.18  |               |             |             | 0.51         | 0.70  |              |         |           |        |        |        |  |
| Li <sub>2</sub> O              | 0.15   | 0.02          | 0.214         | 0.064         | 0.041 | 0.32          | 1.35        | 1.27        | 0.70         | 0.82  | 0.64         | 1.42    | 0.85      | 1.71   | 0.85   | 0.64   |  |
| Rb <sub>2</sub> O              |        |               |               |               |       |               |             |             |              |       | 0.02         |         | 0.02      |        | 0.02   | 0.01   |  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 1.65   |               | 0.02          | 0.01          |       |               |             |             |              | 0.01  |              |         |           |        |        |        |  |
| CO <sub>2</sub>                |        | 0.19          |               |               | 0.19  |               |             |             | 0.22         |       |              |         |           |        |        |        |  |
| F                              | 1.11   | 1.41          |               | 0.23          | 0.395 | 1.18          |             |             | 2.33         | 0.41  | 1.18         |         | 1.22      |        | 1.22   | 1.06   |  |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 3.84   | 0.59          | 1.64          | 1.20          | 1.31  | 0.28          | 1.97        | 4.74        | 0.85         | 3.70  | 0.88         | 4.72    | 4.30      | 4.59   | 4.30   | 4.32   |  |
| -2F=0                          | -0.47  | -0.594        |               | -0.10         | -0.17 | -0.497        |             |             | -0.981       | -0.17 | -0.497       |         | -0.514    |        | -0.514 | -0.446 |  |
| 总和                             | 100.32 | 98.12         | 99.39         | 100.54        | 99.78 | 100.53        | 99.96       | 99.75       | 98.57        | 99.81 | 99.12        | 99.95   | 99.89     | 100.95 | 99.89  | 99.57  |  |
| 颜色                             | 灰蓝色    | 淡蓝色           | 黑色            | 黑色            | 黑色    | 黑色            | 蓝绿色         | 蓝色          | 暗黄绿色         | 蓝绿色   | 黄绿色<br>半透明   | 绿色透明    | 绿色透明      | 黄色透明   | 绿色透明   | 红色透明   |  |

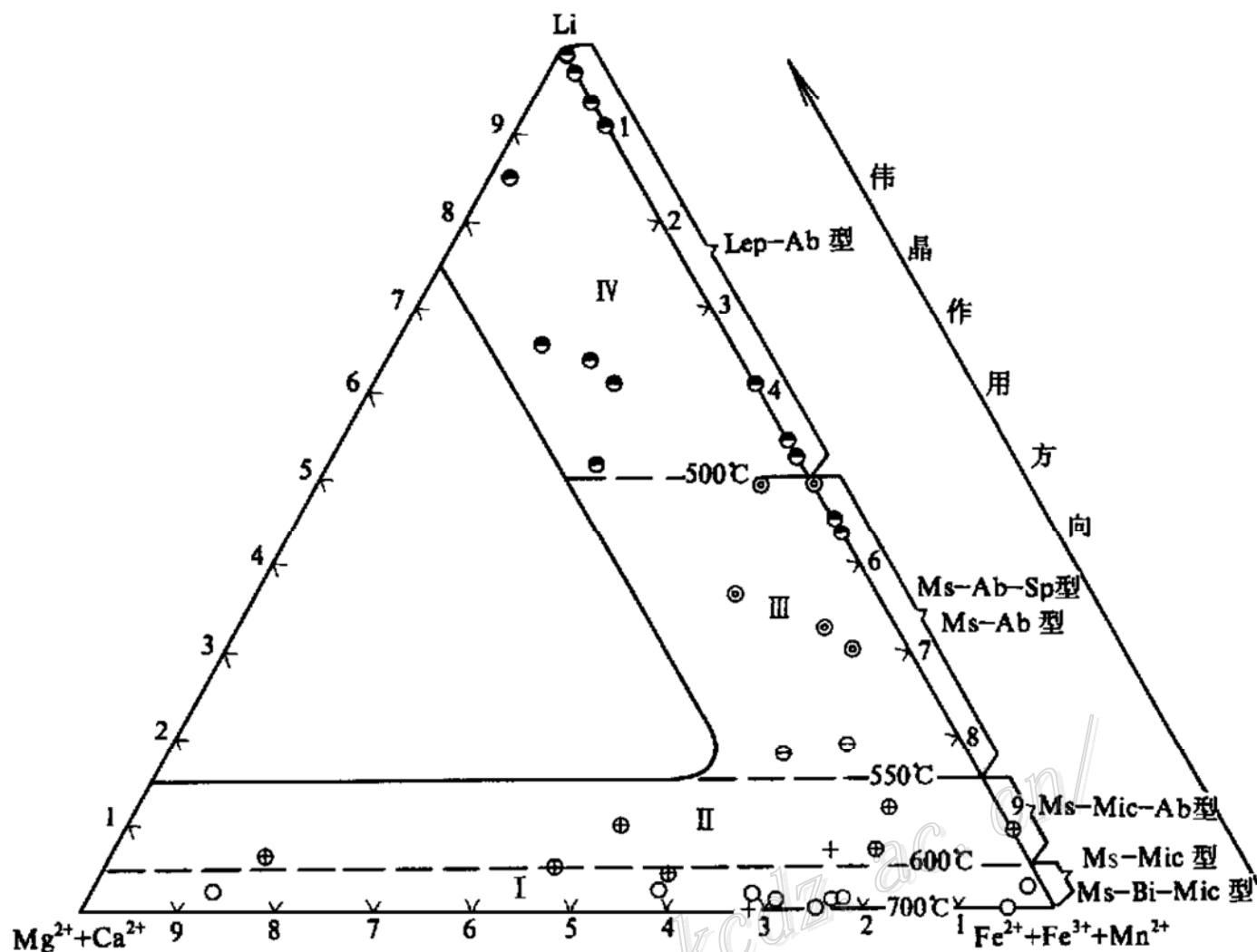


图 1 电气石的  $\text{Li}^+ - (\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}) - (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}^{2+})$  组分变化与伟晶岩类型演化的关系

I —产于二云母-微斜长石型及白云母-微斜长石型伟晶岩的钙镁电气石-铁电气石系列; II —产于白云母-微斜长石-钠长石型伟晶岩的钙镁电气石-铁电气石系列; III —产于白云母-钠长石-锂辉石型及白云母-钠长石型伟晶岩的锂铁电气石; IV —产于锂云母-钠长石型伟晶岩的锂电气石

石型和白云母-钠长石型伟晶岩。而锂电气石则毫无例外地产于最晚期形成的锂云母-钠长石型伟晶岩中。

1.3 镁电气石-锂电气石系列: 由图 1 可见, 此系列为有限的类质同象取代。两成分间有较宽的范围 (20%~80% 区间) 在自然界无电气石形成。

## 2 电气石的颜色

电气石的颜色与成分的关系已引起众多研究者的注意, 笔者据 38 个各色电气石成分研究后认为:

黑色: 为含高  $\text{Fe}^{2+}$  离子引起, 可同时含  $\text{Mn}^{2+}$  离子。一般叫“黑色电气石” (Schorl) 或“铁电气石”。不透明。是最常见的电气石品种。当  $\text{Fe}^{3+}$  离子占优势 ( $\text{Fe}^{3+} \gg \text{Fe}^{2+}$ ) 时, 叫“布格电气石” (Buergerite), 在伟晶岩内产出者也是黑色不透明。

褐色-棕色: 为  $\text{Mg}^{2+}$  离子引起, 若呈灰蓝-浅蓝色是由其内的少量  $\text{Fe}^{2+}$  离子引起。属于这种颜色的电气石主要是“镁电气石” (Dravite) 和“钙镁电气石” (Uvite)。一般不透明一半透明, 少量透明。

蓝色—蓝绿色：已有较多  $\text{Fe}^{2+}$  离子被 ( $\text{Li} + \text{Al}^{3+}$ ) 取代，但仍以  $\text{Fe}^{2+}$  离子起主要作用致色。属于“锂—铁电气石” ( $\text{Li-Schorl}$ )。一般不透明—半透明。

暗绿色—墨绿色—绿色：这类电气石的  $\text{Fe}^{2+}$  离子已多被 ( $\text{Li} + \text{Al}^{3+}$ ) 离子取代，并含有少量  $\text{Mn}^{2+}$  及  $\text{Fe}^{3+}$  离子，但仍是  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  离子致色。属于锂电气石 ( $\text{Elbaite}$ ) 类。多透明。

黄色—黄绿色：主要由  $\text{Fe}^{3+}$  或  $\text{Mn}^{2+}$  离子致色。属于“锂电气石”。多透明。

红色—紫红色：主要为  $\text{Mn}^{3+}$  离子致色。属于“锂电气石”。多透明。

浅绿—淡绿色：虽含有较高的  $\text{Mn}^{2+}$  离子，但仍由少量  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  离子致色。属于“锂电气石”。多透明。

在中国伟晶岩内未发现俄罗斯乌拉尔产出的  $\text{Cr}^{3+}$  致色的翠绿色电气石。

### 3 宝石级电气石——碧玺的特点

中国伟晶岩产宝石级电气石——碧玺，主要为锂电气石，形成于伟晶岩演化最晚期的锂云母—钠长石型伟晶岩内。具有墨绿、绿、浅绿、淡绿、黄绿、蓝、黄、玫瑰红、桃红、粉红等色，也有无色者出现。有时一个晶体从内向外或从根部到端部可出现 2~3 种颜色，因此，又常叫“彩色电气石”。产于晶洞或包裹于锂云母—钠长石之间的石英内者皆透明。而包裹于钠长石内者透明度较差。

由于宝石级电气石都是锂电气石，即是 ( $\text{Li} + \text{Al}^{3+}$ ) 取代了  $\text{Fe}^{2+}$ 。由于  $\text{Li}^{+}$  和  $\text{Al}^{3+}$  离子半径比  $\text{Fe}^{2+}$  离子半径小，故其面网间距、晶胞参数比黑色铁电气石低得多。由于  $\text{Li}$  和  $\text{Al}$  的原子量比  $\text{Fe}$  要小得多，因此，宝石级锂电气石的密度比黑色铁电气石要小得多（前者为 2.971，后者为 3.142）。同理，锂电气石的折射率 ( $N_o = 1.640$ ,  $N_e = 1.626$ ) 也比黑色铁电气石的折射率 ( $N_o = 1.658$ ,  $N_e = 1.640$ ) 低得多，由于宝石级锂电气石贫铁，故其磁性和多色性也较弱。

中国伟晶岩产的淡绿色—无色透明电气石，常含有较高的  $\text{Mn}^{2+}$  离子，经过热处理使  $\text{Mn}^{2+}$  转化为  $\text{Mn}^{3+}$ ，可获得艳丽桃红色电气石。不损伤晶体结构。

中国宝石级电气石主要产于新疆阿尔泰山和天山、内蒙角力格太、秦岭、黑龙江萝北、云南高黎贡山北端及哀牢山南端。