

难的(Moss et al., 1996),也就对变质过程中元素的活动和岩石的质量变化提出了质疑。本文以庐山地区发育的双桥山群变泥质岩系为例,在研究其地球化学组成的基础上,探讨区域变质作用过程中岩石的质量迁移和元素活动性问题(王发宁,1987;杨浩,1990;杨忠芳等,1997)。

1 地质背景

双桥山群是在赣北地区广泛发育的前寒武纪地层,以浅变质的粉砂质、泥质板岩为主体。前人根据该地层中所含的微古植物化石组合特征和变细碧岩夹层的Sm-Nd同位素定年结果(1558.7±19 Ma)将其原岩形成时代确定为中元古代(彭作荣等,1995;胡恭任,1999)。庐山地区的双桥山群具体可分为两个地层组:下部的横涌组和上部的计林组。横涌组底部发育一套变质复成分砾岩,详细的研究表明该砾岩属双桥山群的底砾岩,即双桥山群与下伏古元古代星子群[单颗粒锆石U-Pb年龄值1869±40 Ma(谢国刚等,1997)]为不整合接触关系。

岩相学研究显示,本区双桥山群的主要岩石类型有粉砂质或泥质板岩、黑云母片岩、石榴石片岩、十字石榴石片岩等。总体特征表明其原岩为一套泥质、泥砂质沉积岩,它们经过区域变质作用而成为现今的产物。本次研究的样品采自庐山南面星子县横塘乡至隘口镇一带(图1)。根据特征变质矿物出现的次序,可将该地双桥山群从南往北依次划分为3个变质带,即:绿泥

石带(岩石类型为板岩)、黑云母带(黑云母片岩)、石榴石和十字石带(石榴石片岩、十字石榴石片岩,两者在下文简称(十字)石榴片岩),它们构成了一个不完整的巴洛型递增变质带。鉴于所采样品中未见接触变质作用产物和明显受动力变质作用改造的痕迹,因此本文所述不同变质带间样品的地球化学组成及变化是区域变质作用的结果(赵宗溥,1984)。

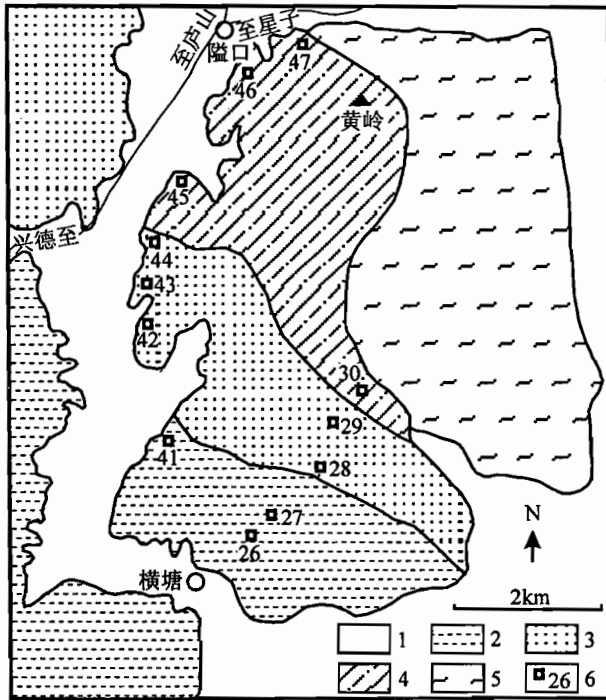


图1 庐山双桥山群变泥质岩分布区地质简图

Fig.1 Geologic sketch map showing the distribution of Shuangqiaoshan Group in Lushan and the sampling locations

1—第四系;2—绿泥石带;3—黑云母带;4—(十字)石榴石带;
5—星子群变质岩;6—采样位置及编号

1—Quaternary; 2—chlorite zone; 3—biotite zone; 4—(staurolite)
garnet zone; 5—Xingzi Group; 6—sampling location and number

2 地球化学组成

在详细的岩相学工作基础上,选取新鲜、具代表性的样品进行主量和微量元素地球化学研究。主量元素用湿化学法分析,总量误差<1%。微量元素采用HF+HNO₃密闭溶样,在ICP-MS上测定,分析时外加标准样GSR-3、JB-1a作为质量监控,包括稀土在内的多数元素的相对误差<5%(其余元素的<10%)。主量和微量元素测定结果列于表1。

2.1 主量元素

表1中的结果表明,双桥山群中3件板岩的各项主量元素组成基本一致,暗示了该区轻微变质的泥质岩组成较为

表 1 庐山双桥山群变泥质岩主量元素(%) and 微量元素($\times 10^{-6}$)组成Table 1 Major element(%) and trace element($\times 10^{-6}$) compositions of the metamorphosed pelites within Shuangqiaoshan Group in Lushan

| 岩石 | 板岩 | | | | 黑云母片岩 | | | | | (十字)石榴片岩 | | | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------------|----------|-------|-------|--------------|
| | 26 | 27 | 41 | 平均值 | 28 | 29 | 42 | 44 | 平均值 | 45 | 46 | 47 | 平均值 |
| SiO ₂ | 63.31 | 63.68 | 62.76 | 63.25(0.46) | 65.09 | 64.88 | 61.51 | 59.12 | 62.65(2.87) | 61.50 | 59.30 | 62.95 | 61.25(1.84) |
| TiO ₂ | 0.63 | 0.48 | 0.67 | 0.59(0.10) | 0.58 | 0.70 | 0.85 | 0.73 | 0.72(0.11) | 0.75 | 0.82 | 0.75 | 0.77(0.04) |
| Al ₂ O ₃ | 17.89 | 18.08 | 17.65 | 17.87(0.22) | 17.01 | 16.70 | 18.12 | 18.32 | 17.54(0.80) | 20.46 | 19.80 | 16.70 | 18.99(2.01) |
| <FeO> | 7.00 | 7.70 | 7.70 | 7.47(0.40) | 7.70 | 6.36 | 7.50 | 10.30 | 7.97(1.66) | 6.50 | 7.60 | 8.10 | 7.40(0.82) |
| MnO | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.08(0.02) | 0.08 | 0.11 | 0.12 | 0.08 | 0.10(0.02) | 0.08 | 0.05 | 0.06 | 0.06(0.02) |
| MgO | 1.50 | 1.00 | 1.62 | 1.37(0.33) | 1.50 | 1.20 | 1.00 | 1.80 | 1.38(0.35) | 0.90 | 1.30 | 2.10 | 1.43(0.61) |
| CaO | 0.60 | 0.50 | 0.50 | 0.53(0.06) | 0.60 | 0.80 | 0.30 | 0.50 | 0.55(0.21) | 0.20 | 0.30 | 0.80 | 0.43(0.32) |
| Na ₂ O | 1.60 | 1.54 | 1.64 | 1.59(0.05) | 1.29 | 0.81 | 0.48 | 0.47 | 0.76(0.39) | 0.40 | 0.50 | 1.10 | 0.67(0.38) |
| K ₂ O | 2.85 | 3.23 | 3.04 | 3.04(0.19) | 2.70 | 3.00 | 3.19 | 2.38 | 2.82(0.35) | 3.68 | 2.92 | 2.95 | 3.18(0.43) |
| P ₂ O ₅ | 0.10 | 0.18 | 0.18 | 0.15(0.05) | 0.06 | 0.09 | 0.08 | 0.26 | 0.12(0.09) | 0.09 | 0.15 | 0.12 | 0.12(0.03) |
| 烧失量 | 4.28 | 3.15 | 3.48 | 3.64(0.67) | 3.20 | 4.64 | 6.31 | 5.74 | 4.97(1.38) | 5.10 | 6.40 | 3.40 | 4.97(1.50) |
| 总量 | 99.85 | 99.63 | 99.30 | 99.59(0.28) | 99.81 | 99.29 | 99.46 | 99.70 | 99.57(0.23) | 99.66 | 99.14 | 99.03 | 99.28(0.34) |
| Rb | 116.0 | 130.6 | 124.4 | 123.7(7.3) | 104.5 | 136.3 | 118.6 | 122.1 | 120.4(13.1) | 154.1 | 97.6 | 93.8 | 115.2(33.8) |
| Sr | 99.2 | 87.4 | 71.1 | 85.9(14.1) | 41.2 | 71.0 | 31.7 | 18.5 | 40.6(22.3) | 42.0 | 52.5 | 75.0 | 56.5(16.9) |
| Ba | 558 | 560 | 490 | 536(40) | 557 | 363 | 867 | 549 | 584(209) | 730 | 638 | 571 | 646(80) |
| Sc | 17.6 | 19.4 | 19.0 | 18.7(0.9) | 16.6 | 17.5 | 27.2 | 18.1 | 19.9(4.9) | 21.0 | 22.1 | 17.5 | 20.2(2.4) |
| Th | 8.72 | 9.54 | 8.78 | 9.01(0.46) | 9.25 | 9.40 | 12.63 | 8.37 | 9.91(1.87) | 12.57 | 9.30 | 6.73 | 9.53(2.93) |
| U | 2.98 | 1.82 | 1.90 | 2.23(0.65) | 1.93 | 2.94 | 2.13 | 1.66 | 2.17(0.55) | 2.44 | 1.53 | 1.21 | 1.73(0.64) |
| Zr | 142.9 | 130.3 | 168.1 | 147.1(19.2) | 168.0 | 197.0 | 189.9 | 139.7 | 173.7(25.8) | 167.7 | 92.9 | 67.2 | 109.3(52.2) |
| Hf | 4.32 | 7.38 | 5.04 | 5.58(1.60) | 5.18 | 5.62 | 6.71 | 4.13 | 5.41(1.07) | 5.12 | 3.07 | 2.04 | 3.41(1.57) |
| Nb | 11.74 | 11.79 | 11.65 | 11.73(0.07) | 11.36 | 10.50 | 14.28 | 13.13 | 12.32(1.71) | 13.05 | 12.32 | 10.58 | 11.98(1.27) |
| Ta | 0.86 | 0.92 | 0.83 | 0.87(0.05) | 0.89 | 0.86 | 1.13 | 0.95 | 0.96(0.12) | 1.13 | 0.98 | 0.85 | 0.99(0.14) |
| V | 99.3 | 102.1 | 100.9 | 100.8(1.4) | 98.0 | 109.1 | 143.2 | 101.0 | 112.8(20.8) | 115.9 | 125.1 | 109.8 | 116.9(7.7) |
| Cr | 62.9 | 70.2 | 70.0 | 67.7(4.2) | 66.7 | 74.0 | 113.7 | 78.7 | 83.3(20.9) | 86.8 | 91.1 | 75.1 | 84.3(8.3) |
| Co | 9.1 | 8.8 | 8.0 | 8.6(0.6) | 12.4 | 11.6 | 7.5 | 20.2 | 12.9(5.3) | 14.6 | 16.6 | 14.0 | 15.1(1.4) |
| Ni | 26.3 | 37.3 | 32.4 | 32.0(5.5) | 31.5 | 27.2 | 37.8 | 52.2 | 37.2(10.9) | 37.6 | 49.5 | 34.9 | 40.7(7.8) |
| Y | 21.94 | 19.56 | 25.68 | 22.39(3.09) | 50.86 | 24.21 | 51.96 | 27.58 | 38.65(14.80) | 26.90 | 34.10 | 16.86 | 25.95(8.66) |
| La | 37.74 | 36.31 | 35.02 | 36.36(1.36) | 77.10 | 29.44 | 62.76 | 71.91 | 60.30(21.41) | 50.26 | 34.27 | 23.72 | 36.08(13.36) |
| Ce | 60.33 | 65.84 | 38.26 | 54.81(14.60) | 77.81 | 54.25 | 58.80 | 92.10 | 70.74(17.52) | 86.21 | 55.68 | 46.58 | 62.82(20.76) |
| Pr | 9.01 | 9.22 | 8.53 | 8.92(0.35) | 19.09 | 7.95 | 17.18 | 18.12 | 15.59(5.15) | 12.68 | 8.62 | 5.94 | 9.08(3.39) |
| Nd | 36.20 | 36.25 | 34.45 | 35.63(1.03) | 75.47 | 29.09 | 69.72 | 75.75 | 62.51(22.45) | 52.23 | 35.43 | 23.75 | 37.14(14.32) |
| Sm | 6.92 | 7.30 | 6.85 | 7.02(0.24) | 14.96 | 6.37 | 14.14 | 13.46 | 12.23(3.96) | 10.08 | 6.97 | 4.96 | 7.34(2.58) |
| Eu | 1.53 | 1.51 | 1.52 | 1.52(0.01) | 3.25 | 1.29 | 3.30 | 2.85 | 2.67(0.94) | 1.95 | 1.74 | 1.19 | 1.63(0.39) |
| Gd | 6.63 | 5.27 | 5.16 | 5.69(0.82) | 12.02 | 4.97 | 11.40 | 10.15 | 9.64(3.21) | 7.68 | 6.00 | 3.96 | 5.88(1.86) |
| Tb | 0.70 | 0.84 | 0.84 | 0.79(0.08) | 1.78 | 0.80 | 1.74 | 1.26 | 1.40(0.46) | 0.99 | 0.93 | 0.63 | 0.85(0.19) |
| Dy | 4.49 | 4.03 | 5.14 | 4.55(0.56) | 10.25 | 4.37 | 10.61 | 6.00 | 7.81(3.10) | 5.98 | 6.58 | 3.64 | 5.40(1.55) |
| Ho | 0.82 | 0.86 | 1.00 | 0.89(0.09) | 1.78 | 0.86 | 1.95 | 1.02 | 1.40(0.54) | 1.03 | 1.28 | 0.64 | 0.98(0.32) |
| Er | 2.56 | 2.29 | 2.93 | 2.59(0.32) | 5.21 | 2.69 | 5.68 | 2.78 | 4.09(1.58) | 3.04 | 4.03 | 2.01 | 3.03(1.01) |
| Tm | 0.33 | 0.32 | 0.41 | 0.35(0.05) | 0.58 | 0.41 | 0.72 | 0.31 | 0.51(0.18) | 0.42 | 0.50 | 0.25 | 0.39(0.13) |
| Yb | 2.68 | 2.51 | 3.21 | 2.80(0.37) | 4.10 | 3.11 | 5.49 | 2.64 | 3.84(1.26) | 3.65 | 4.66 | 2.15 | 3.49(1.26) |
| Lu | 0.44 | 0.39 | 0.47 | 0.43(0.04) | 0.54 | 0.57 | 0.75 | 0.38 | 0.56(0.15) | 0.54 | 0.55 | 0.30 | 0.46(0.14) |
| Eu/Eu* | 0.70 | 0.75 | 0.79 | | 0.75 | 0.71 | 0.80 | 0.75 | | 0.68 | 0.83 | 0.83 | |
| LaN/YbN | 8.80 | 9.55 | 7.64 | | 14.64 | 7.70 | 8.58 | 19.40 | | 9.54 | 6.39 | 8.11 | |

注:主元素用湿化学法测定,微量元素用 ICP-MS 分析,分别由中国科学院矿床开放研究实验室李恭蓉和漆亮完成;括号内数字为标准差;球粒陨石的稀土元素含量引自 McLennan(1989)。(FeO)表示全铁,主元素分析未精确测定 FeO。

均一,其中 SiO_2 的含量约 63%,与澳大利亚后太古代页岩(PAAS)的 SiO_2 含量 62.8%(Taylor, 1985)很接近。与板岩不同,黑云母片岩、(十字)石榴片岩的各项主量元素组成变化稍大,其各自平均值与板岩的对比显示,从板岩→黑云母片岩→(十字)石榴片岩, SiO_2 、 Na_2O 明显降低, TiO_2 依上述顺序明显升高; Al_2O_3 、 K_2O 则在黑云母片岩中最低,其变化规律不甚明显,这可能是由于泥质岩局部的不均一性造成的,因泥质岩及其变质产物分别富含粘土矿物和云母,以富集 Al_2O_3 、 K_2O 两种组分为特征,因此如增加研究样品的数量,其基本趋势将会与 SiO_2 、 Na_2O 的变化类似。其他主量元素,包括 $\langle\text{FeO}\rangle$ (全铁)、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 P_2O_5 等则基本不变。此外,烧失量的变化没有明显的规律,它主要是受岩石中含水矿物(云母等)的含量不等所制约,同时岩石中含有不等量的黄铁矿和有机质也是烧失量变化较大的原因。上述主量元素特征在 M/TiO_2 (分子数比, M 为 TiO_2 之外的其他主量元素)对 TiO_2 含量的协变图上得以清楚地显示(图 2),图中表明本区 10 件全岩样品的 SiO_2 (Na_2O 、 K_2O 、 Al_2O_3)/ TiO_2 的分子数比分别与 TiO_2 含量呈现各自明显的线性相关性,该趋势是前述 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 降低,而 TiO_2 相对升高的共同结果,其他主量元素则与之不同,无类似的线性关系。

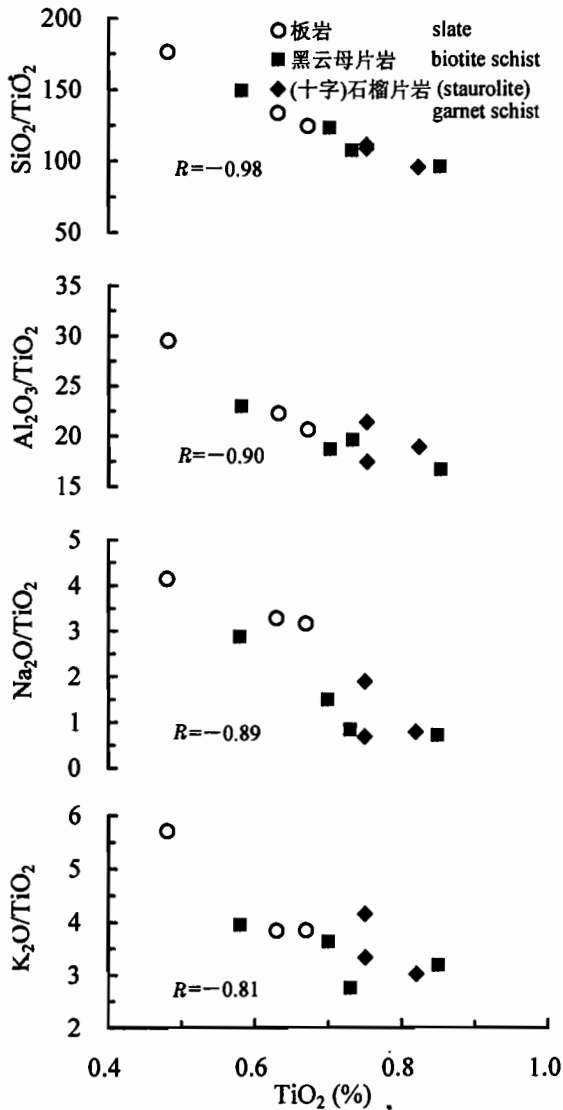


图 2 主量元素 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ (分子数比)对 TiO_2 含量的变异图(R 为相关系数)

Fig. 2 Molar ratios of SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ vs TiO_2 variation diagram

此外,烧失量的变化没有明显的规律,它主要是受岩石中含水矿物(云母等)的含量不等所制约,同时岩石中含有不等量的黄铁矿和有机质也是烧失量变化较大的原因。上述主量元素特征在 M/TiO_2 (分子数比, M 为 TiO_2 之外的其他主量元素)对 TiO_2 含量的协变图上得以清楚地显示(图 2),图中表明本区 10 件全岩样品的 SiO_2 (Na_2O 、 K_2O 、 Al_2O_3)/ TiO_2 的分子数比分别与 TiO_2 含量呈现各自明显的线性相关性,该趋势是前述 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 降低,而 TiO_2 相对升高的共同结果,其他主量元素则与之不同,无类似的线性关系。

2.2 微量元素

与主量元素类似,双桥山群中 3 件板岩样品的微量元素(包括稀土元素)也基本一致,进一步表明了它们地球化学组成的相对均一。与之不同,两组片岩的微量元素组成则各自变化较大,反映了变质作用增强时微量元素丰度的可能变化。对比 3 个变质带不同岩石类型的微量元素测定结果(表 1),可以看到如下特征。

(1) Rb 、 Sr 、 Ba 等大离子亲石元素有较大的变化,其中 Sr 在黑云母片岩中明显减少,并由此导致 Rb/Sr 和 Ba/Sr 值的相应增大(表 1,图 3a)。相对于 Sr 、 Rb 和 Ba 的变化不甚明显。由于 Rb 、 Ba 主要赋存于含钾矿物中,而 Sr 则主要替代 Ca ,因此上述元素的变化正是本区岩石中普遍富含云母(板岩中含绢云母、片岩中以黑云母为主还有白云母)而少有长石类矿物的地球化学表现。同时, Rb 、 Sr 、 Ba 的较大变化,进一步显示了

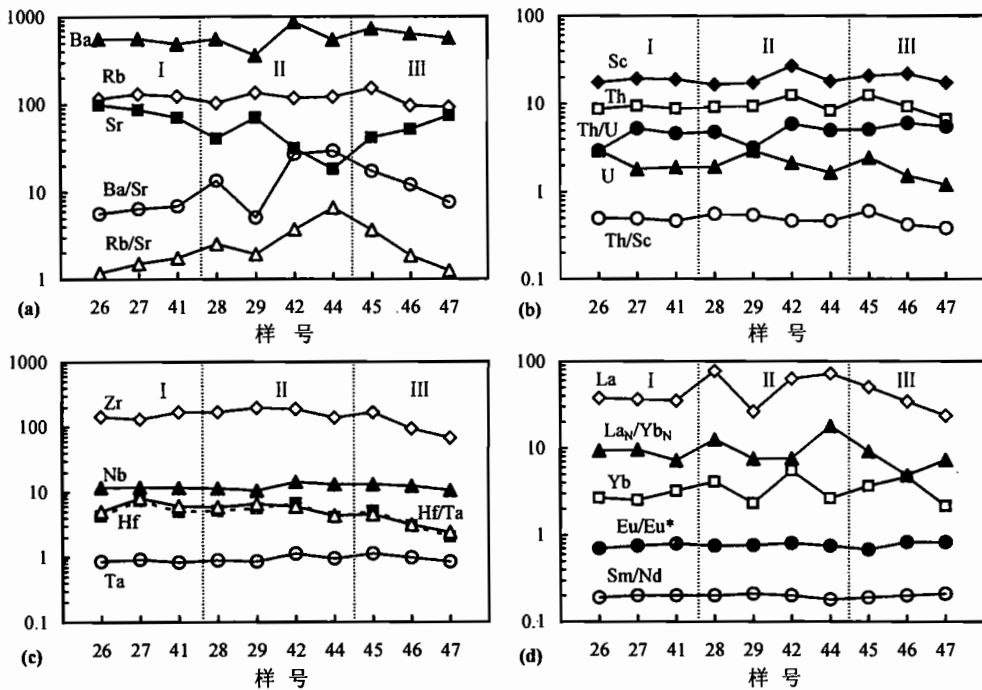


图 3 部分微量元素及其比值变化图

(横坐标代表样品号,同图 1 和表 1;纵坐标当为元素时,单位为 $\times 10^{-6}$)

Fig. 3 Variation diagrams of some trace-element concentrations and their ratios

(X axis standing for the sample numbers same as in fig. 1 and table 1;

when ordinate is content of trace element, the unit is $\times 10^{-6}$)

I、II、III 分别表示板岩、黑云母片岩、(十字)石榴片岩,图中以虚线分隔

I, II, III are slate, biotite schist, (staurolite) garnet schist, respectively

在低中级区域变质条件下它们也具活动性。

(2) Sc、Th 在 3 种岩类中变化不大,仅样品 42 的稍高外,其余均很接近(表 1,图 3b), Th/Sc 值基本在 0.5。较之 Sc 和 Th、U 的变化稍大,总体表现为由板岩→片岩的降低趋势,且明显较 PAAS 的 3.1(Taylor, 1985)要低。

(3) 高场强元素(HFSE)Zr、Hf、Nb、Ta 基本没有变化(表 1,图 3c),表明了该类变质作用条件下它们同样是相对不活泼的元素。

根据上述 Th 和 HFSE 含量较为稳定的特点可以推论,该区岩石在变质过程中副矿物(如锆石等)也相对稳定。因此,考虑到泥质岩中部分 U 是由粘土矿物所吸附的,岩石变质过程中 U 含量的降低可能是流体作用下 U 的解吸并随流体发生迁移的结果。

此外,铁族元素 V、Cr、Co、Ni 等与全铁含量的变化类似,在 3 种岩石中基本一致(表 1),表明它们在该区上述变质过程中的相对稳定性。

2.3 稀土元素

稀土元素作为一组具有重要地球化学示踪意义的特殊微量元素,在变质作用的研究中同样受到高度重视。本区双桥山群全岩样品的稀土元素组成(表 1)显示,板岩的稀土元素总量和 La_N/Yb_N 值均与 PAAS 的很接近(图 4),而片岩(尤其是黑云母片岩)的稀土元素总量和 La_N/Yb_N

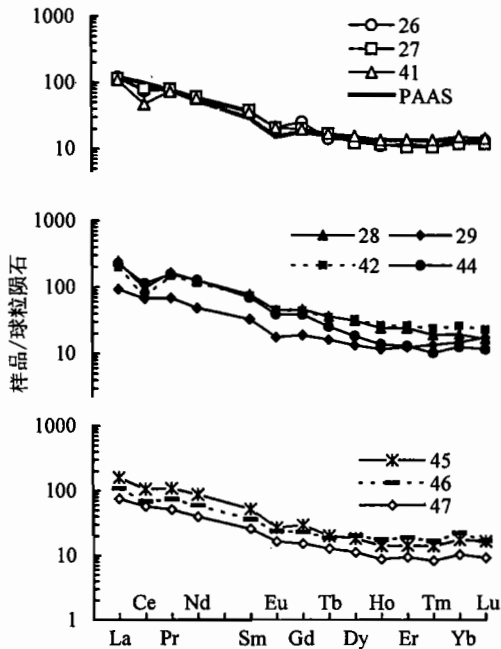


图4 球粒陨石标准化稀土元素配分模式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns

图中样品号同表1

Sample number in figure same as table 1

Yb_N 值则变化较大,表现出轻、重稀土元素的变化明显(图 3d)。尽管如此,3种岩石的 Sm/Nd 值基本恒定(0.20 ± 0.01; N = 10),Eu 异常(~0.80)也很一致(表 1,图 3d),并且稀土元素球粒陨石(Taylor,1977)标准化配分模式相近似(图 4),表明了在上述变质过程中岩石的稀土元素主要是作为元素组整体发生变化的。

值得注意的是本区 3 种岩石普遍具 Ce 负异常(表 1,图 4),其中黑云母片岩的异常程度高于板岩,而(十字)石榴片岩的 Ce 负异常与板岩接近。由于变质作用是在相对还原条件下进行的,同时样品的地表改造也可排除,因此上述岩石普遍具有的 Ce 负异常很可能是继承了原岩的特征,反映双桥山群原始沉积物与海水达到了平衡(McLennan,1989),推测其原岩形成环境为海相。

3 讨论

3.1 岩石的质量迁移与元素活动

在研究交代作用过程中岩石的体积和浓度变化时,Gresens(1967)首先提出了定量计算的方法,并由 Grant(1986)进行了有效的简化。该方法能很好地用以定量探讨交代过程中岩石质量和组分浓度的得失。与之类似,Ague(1991)在研究变质作用中岩石的质量迁移时也根据质量平衡原理建立了定量计算方法:

$$T_i = [(最终质量 - 初始质量) / 初始质量] \times 100 = [(C_i^o - C_i^f) / C_i^f] \times 100$$

$$r_j = (C_i^o C_j^f / C_i^f C_j^o - 1) \times 100$$

式中 T_i , r_j 分别是岩石的总体质量变化和具体活动组分(j)的质量变化百分数; C_i^o , C_j^o 和 C_i^f , C_j^f 为不活动的参照组分(i)和具体活动组分(j)分别在初始和终了状态的浓度。正如 Ague(1991)所强调的,要进行上述计算,需要两个基本条件:一是知道变质岩的原岩组成;二是确定不活动的参照元素。

对于条件一,解决的最佳方案是找到与发生变质的岩石相对应的没有变质的残留体作为原岩(Hellman,1979),但由于一个地区发生区域变质作用时,同一套岩石一般都程度不同地发生了变质。因此,以其中最轻微变质的岩石近似原岩也不失为一种较好的办法(Auge,1991; Moss,1995)。就本区而言,由于 3 类岩石的原岩都是细粒的泥质岩,在其搬运、沉积过程中经历了较为充分的均一化,从而原岩的差异可以忽略,同时考虑到 3 类岩石分布在不大的范围内,因此,可以认为板岩近似的是它们共同的原岩。正是由于这种小范围内有多个变质带的发育为本文问题的讨论提供了很好的实例。满足条件二的组分通常认为有 Ti、Al 等相对不活动的元素(Ferry,1983; Ague,1991; Condie,1996; Klummer,1997; 解庆林等,1997; 高斌等,1999)。尽管 Al 在泥质岩中含量较高,它相对于多数元素是较稳定的,但变质作用过程中仍有一定程

度的活动性(Kerrick, 1988; Ague, 1991),而 Ti 的活动性是相当有限的(Van Baalen, 1993),因此 Ti 是更好的参照元素。实际上,由前述本区变泥质岩的主量元素 $\text{SiO}_2(\text{Al}_2\text{O}_3、\text{Na}_2\text{O}、\text{K}_2\text{O})/\text{TiO}_2$ 的分子数比与 TiO_2 含量之间随变质程度增强的线性相关性(图 2)也暗示了选择 Ti 作为不活动的参照元素是适宜的。

根据上述讨论,笔者以双桥山群中的板岩近似两类片岩的原岩(其组成以平均值代表,表 1),将 Ti 作为不活动参照组分,由 Ague(1991)的方法,用平均岩石和具体样品的组成(表 1),计算出形成黑云母片岩和(十字)石榴片岩时岩石总体质量损失的平均值及其变化范围分别为 17%(0~30%)和 23%(21%~28%)。其质量损失的平均值分别与前人据大量绿片岩相、角闪岩相变泥质岩平均值计算的质量损失量(Ague, 1991)很接近,其中约 70%的损失量是 SiO_2 ,其他有明显损失的组分还有 Na、K、Al 及部分微量元素。由质量损失的变化范围表明,岩石的质量迁移有一定的不均一性,同样很可能是由于原岩组成的不均一所致,因此对更多样品的研究是必要的,但以上总体规律将不会改变。应该指出,本文讨论的岩石质量迁移是针对不同的变质带而言,即属于带外迁移性质。实际上所研究的样品未见明显显示带内组分重新分配的现象,如手标本或显微尺度石英脉的发育,也表明岩石中 SiO_2 等的迁移性质如此。

岩石在变质作用过程中质量损失的根本原因是具活动性的元素发生了迁移。正是由于部分相对活动元素的迁移,岩石的质量和体积随之减少,从而导致了不活动元素的浓度相对升高。发生迁移的活动性元素,除了 Si、Na、K、Al 等主量元素外,还有岩石中的微量元素。利用 Grant(1986)在研究交代作用的元素活动性时提出的等浓度图解表示法,可以得到本区双桥山群中黑云母片岩、(十字)石榴片岩分别相对于板岩的元素变化特征(图 5a、5b)。图 5 中实线为通过不活动元素 Ti 的等浓度线,虚线是由前述 Th、Sc、Nb、Ta 等较为稳定元素确定的等浓度线,因此位于上述等浓度线上及之间的元素是不活动或活动性不明显的,在此之外的则是活动性较强的元素。

综合图 5 中元素点的分布特征可见,主量元素 Si、Na 和微量元素 Sr、Rb、U 等在片岩中有明显的损失,表明它们具较强的活动性,其次 K、Al 也有一定程度的变化。相反,Ti、Fe、Mg、Mn、Cr、Co、Ni、V、Th、Sc、Nb、Ta、Zr 等则表现为较稳定。此外,尽管在图 5b 中稀土元素(图中轻稀土和重稀土分别以 LR、HR 表示)落入相对不活动元素区,但图 5a 显示,在黑云母片岩中稀土元素有明显的增加,从而表明它们也是具有一定活动性的元素。对于稀土元素在变质作用过程中是否活动一直有很大争议,较多新的研究表明,在流体作用下它们的活动性是无疑的(Condie, 1996),因此流体作用对元素的活动具有重要意义。

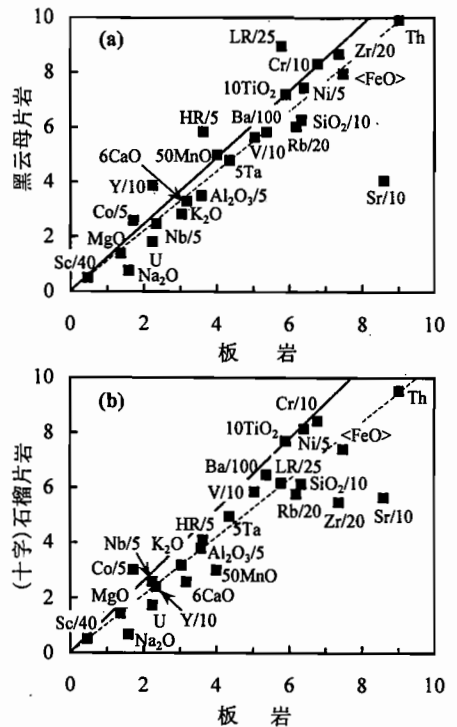


图 5 黑云母片岩(a)和(十字)石榴片岩(b)相对于板岩的元素等浓度图 (详细解释见正文)

Fig. 5 Isocon plot of biotite schist (a) and (staurolite) garnet schist (b) element concentrations versus concentrations in slate (see text for the detailed explanations)

3.2 流体作用:元素活动和岩石质量变化的动力

变质作用过程中岩石发生脱挥发分反应而形成流体相——变质流体的事实早已为人们所重视(Fyfe et al., 1978)。该流体反过来对岩石的变质作用具一定的制约,其中之一是对岩石中元素地球化学行为的控制。而流体性质和通量(等效于水/岩比值)是其主要控制因素。

实验和许多实例研究表明, Si、Al 在碱性溶液中更易于活动(Kerrick, 1988)。而对于泥质岩石, 区域变质作用过程中主要是脱水, 从而形成相对碱性的变质流体, 因此 Si、Al 等元素的活化、迁移是该种流体对岩石作用的结果。实际上, 前述双桥山群变泥质岩中元素的活动及其导致的岩石质量损失, 正是由于变质流体对岩石中相对易溶元素的作用, 使得它们随流体而发生活化迁移的结果。以 Si 为主还有 Na、K、Al 等元素活化迁移的地质证据是某些变质岩中发育大量同变质期的石英脉、长英质脉, 它们是富含上述元素的流体的直接产物。此外, 由于变质岩的原岩性质、岩石的结构构造及变质温压条件制约着变质流体的性质及其迁移能力, 它们无疑也是岩石质量变化和元素活动的间接控制因素。

因富硅流体具类似熔体的性质, 它不仅能迁移上述相对活动的元素, 还可以使 Au、Ag、U 等成矿金属元素活化迁移(Wilkinson et al., 1996), 且实验结果显示配合物 $Au(H_3SiO_4)$ 在碱性条件下更为稳定(樊文苓等, 1995), 暗示了泥质岩变质过程中形成的以水为主、相对碱性及富硅的变质流体更易于使 Au 活化迁移, 并可能最终富集成矿。古老碎屑变质岩中大量石英脉型金矿床的发育可能与此相关。因此, 关于区域变质作用过程中元素活动和岩石质量迁移的探讨, 对于矿床(尤其是与变质作用相关的改造型矿床)成因的研究也具有一定意义。

参 考 文 献

- 樊文苓, 王声远, 田弋夫. 1995. 金在碱性富硅热液中溶解和迁移的实验研究. 矿物学报, 15(2): 176~184.
- 高斌, 马东升, 刘连文. 1999. 围岩蚀变过程中地球化学组分质量迁移计算——以湖南沃溪金锑钨矿床为例. 地质学报, 73(3): 272~277.
- 郭福生, 辜骏如, 林银山等. 1998. 大别造山带地壳的元素丰度. 地质论评, 44(2): 172~180.
- 胡恭任, 章邦桐, 于瑞莲. 1999. 赣中变质岩带的 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年代研究. 地质论评, 45(2): 129~134.
- 黎彤. 1985. 岩石圈及其结构层的元素丰度. 地质学报, 59(3): 219~227.
- 马振东, 张本仁, 蒋敬业等. 1998. 长江中下游及邻区基底和花岗岩成矿元素丰度背景的研究. 地质学报, 72(3): 267~275.
- 彭作荣, 吴新华, 韩仲仁. 1995. 江西省都昌县大港地区双桥山群微古植物化石组合特征. 中国区域地质, 14(2): 131~134.
- 王发宁. 1987. 与区域变质作用有关的钨矿床及控矿因素. 地质论评, 33(5): 417~425.
- 谢国刚, 李均辉, 李武显等. 1997. 庐山前震旦纪岩石中锆石 U-Pb 法定年与其地质意义. 地质科学, 32(1): 110~115.
- 谢国刚. 1997. 论江西双桥山群的底界问题. 中国区域地质, 16(4): 410~414.
- 解庆林, 马东升, 刘英俊. 1997. 蚀变岩中物质迁移的定量计算——以锡矿山锑矿床为例. 地质论评, 43(1): 106~112.
- 杨浩. 1990. 论微量元素协变关系的应用. 地质论评, 36(1): 69~80.
- 杨忠芳, 陈岳龙. 1997. 陆源碎屑沉积作用对化学元素配分的制约——兼论五台地区前寒武纪碎屑沉积岩示踪源区陆壳成分的意义. 地质论评, 43(6): 593~600.
- 赵宗溥. 1984. 成岩作用, 埋藏变质作用与近变质作用. 地质论评, 30(5): 501~509.
- Ague J J. 1991. Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites. *Geology*, 19: 855~858.
- Ague J J. 1994. Mass transfer during Barrovian metamorphism of pelites, south-central Connecticut. I: Evidence for composition and volume change. *Am. J. Sci.*, 294: 989~1057.
- Ague J J. 1997. Compositional variations in metamorphosed sediments of the Littleton Formation, New Hampshire. *Am. J. Sci.*, 297: 440~449.
- Condie K C, Sinha A K. 1996. Rare earth and other trace element mobility during mylonitization: a comparison of the Brevard and Hope Valley shear zones in the Appalachian Mountains, USA. *J. Metamorphic Geol.*, 14: 213~226.
- Ferry J M. 1983. Mineral reactions and element migration during metamorphism of calcareous sediments from the Vassalboro Formation, south-central Maine. *Am. Mineral.*, 68: 334~354.

- Fyfe W S, Price N J, Thompson A B. 1978. Fluids in the Earth's Crust. Amsterdam; Elsevier, 129~162.
- Gresens R L. 1967. Composition-volume relationships of metasomatism. *Chem. Geol.*, 2: 47~55.
- Grant J A. 1986. The isocon diagram-A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Econ. Geol.*, 81: 1976~1982.
- Hellman P L, Smith R E, Henderson P. 1979. The mobility of the rare earth elements; Evidence and implications from selected terrains affected by burial metamorphism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 71: 23~44.
- Klammer D. 1997. Mass change during extreme acide-sulphate hydrothermal alteration of a Tertiary latite, Styria, Austria. *Chem. Geol.*, 141: 33~48.
- Kerrick D M. 1988. Al₂SiO₅-bearing segregations in the Lepontine Alps Switzerland; Aluminum mobility in metapelites. *Geology*, 7: 636~640.
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. In Lipin B R, Mckay G A, ed. *Reviews of Mineralogy*, 21: 169~200.
- Moss B E, Haskin L A, Dymek R F, et al. 1995. Redetermination and reevaluation of compositional variations in metamorphosed sediments of the Littleton Formation, New Hampshire. *Am. J. Sci.*, 295: 988~1019.
- Moss B E, Haskin L A, Dymek R F. 1996. Compositional variation in metamorphosed sediments of the Littleton Formation, New Hampshire, and the Carrabassett Formation, Maine, at sub-hand specimen, outcrop, and regional scales. *Am. J. Sci.*, 296: 473~505.
- Shaw D M. 1956. Geochemistry of pelitic rocks. Part III. Major elements and general geochemistry. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 67: 919~934.
- Taylor S R, Gorton M P. 1977. Geochemical application of spark source mass spectrograph-III: element sensitivity, precision and accuracy. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41: 1375~1380.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. Oxford; Blackwell, 9~56.
- Van Baalen M R. 1993. Titanium mobility in metamorphic systems: a review. *Chem. Geol.*, 110: 233~249.
- Walther J V, Holdaway M J. 1995. Comment: Mass transfer during Barrovian metamorphism. *Am. J. Sci.*, 1020~1025.
- Wilkinson J J, Nolan J, Rankin A H. 1996. Silicothermal fluid: A novel medium for mass transport in the lithosphere. *Geology*, 1996, 24: 1059~1062.
- Wood B J, Walther J V. 1986. Fluid flow during metamorphism and implications for fluid-rock ratios. In: Walther J V, Wood B J, ed. *Fluid-Rock Interactions During Metamorphism*. New York; Springer-Verlag, 89~108.
- Yardley B W D. 1977. Relationship between the chemical and modal compositions of metapelites from Connemara, Ireland. *Lithos*, 10: 235~242.

Mass Transfer and Element Mobility of Rocks During Regional Metamorphism

—A Case Study of Metamorphosed Pelites from the Shuangqiaoshan Group in Lushan

Tang Hongfeng¹⁾ Liu Congqiang¹⁾ Xie Guogang²⁾

1) *Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002*; 2) *Jiangxi Institute of Geological and Mineral Survey, Xiangtang, Jiangxi, 330201*

Abstract

According to mass balance analysis and their geochemical compositions, the mass transfer and element mobility during regional metamorphism of the pelites of the Shuangqiaoshan Group in the Lushan region are discussed. The results show that the total mass loss values, estimated relative to the low-grade slate using Ti as the immobile reference element, are around 17% and 23% for the biotite schist and (staurolite)—garnet schist, respectively. The elements Si, Na, K, Rb and Sr have significant mobility while Al, U, REEs etc. are mobile to some degrees during regional metamorphism of the pelites of the Shuangqiaoshan Group. The mass change and the mobility of some elements in question result from the effects of metamorphic fluids on the rocks

during the regional metamorphism.

Key words: regional metamorphism; mass transfer; element mobility; Shuangqiaoshan Group; Lushan

作 者 简 介

唐红峰,男,1963年生。1986年毕业于武汉地质学院地质学专业,1989年和1997年分别在中南工业大学地质系和南京大学地球科学系获工科硕士和理学博士学位。现为中国科学院地球化学研究所博士后,主要从事岩石学和地球化学研究工作。通讯地址:550002,贵州省贵阳市观水路73号,中国科学院地球化学研究所。
