

柿竹园多金属矿床的分形时—空结构 ——以矽卡岩矿物中 Sn 等成矿元素分布特征为例

陆 琦 刘惠芳

(中国地质大学测试中心, 武汉 430074)

摘要: 湖南柿竹园 W, Sn, Mo, Bi 多金属矿床是一个特大型矿床, 其成矿系统极其复杂, 表现为多层次、多子系统。通过微区成分分析等手段, 详细地研究了该矿床块状矽卡岩石榴子石等矿物中 Sn, W, Bi 等元素的分布, 证实了 Sn 等元素的质量分数在矿床宏观分布上和矿物内部微观分布上, 均具幂律分布规律, 即具分形时—空结构。Sn 元素在石榴子石中分布的分形维为 1.7; 在符山石中的分形维为 1.8; 在后期绿帘石中的分形维为 1.9。从矿物晶体微观成矿元素的分布特征来看, 成矿巨系统常处于临界状态, 当其受到扰动, 就产生响应, 通过间断性阵发—平衡(相对静止)的往复而复归临界状态, 这种自组织的临界状态是该矿床动力学的最基本特点。

关键词: 石榴子石; Sn 元素分布; 分形时—空结构; 柿竹园多金属矿床。

中图分类号: P611.1; P628 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2001)02-0123-06

作者简介: 陆琦, 男, 教授, 博士生导师, 1942 年生, 1966 年毕业于北京地质学院, 1981 年获硕士学位, 主要从事矿物、岩石、矿床学研究和教学工作。

柿竹园 W—Sn—Mo—Bi 多金属矿床位于中国湖南郴州市东南, 是一个超大型多金属矿床^[1~3]。近年来, 在柿竹园矿床外围又发现了一批规模可观的 Pb, Zn, Ag 矿床。该特大型矿床由 3 个不同阶段不同成矿作用叠加而成, 它们分别与本矿区千里山花岗岩 3 个成岩阶段——似斑状黑云母花岗岩、等粒黑云母花岗岩和花岗斑岩有着成因联系。第一矿化阶段包括含矿钙质矽卡岩和含矿退化蚀变岩; 第二矿化阶段为云英岩矿化, 在空间上叠加于块状矽卡岩及外部大理岩之上, 这两个阶段的矿化均以 W—Sn—Mo—Bi 为主; 第三阶段为与锰质矽卡岩相伴生的 Pb—Zn—Ag 矿化。在矽卡岩及退化蚀变矿化阶段主要的造岩矿物有石榴子石、辉石、符山石、硅灰石、绿帘石、角闪石、绿泥石、长石等, 主要的矿石矿物为白钨矿、锡石、辉铋矿及铋的硫酸盐矿物; 氟—硼类矿物除萤石广泛分布外, 尚有氟硼镁矿、硼镁铁矿、硅硼钙石等。其中石榴子石、符山石、绿帘石、角闪石、锡石、白钨矿等矿物经常出现光性环带和成分环带, 或两者兼有之。

本研究工作表明, 石榴子石、符山石及绿帘石等矽卡岩矿物的成分环带和 Sn 等成矿元素在其中的分布均表现出具有振荡分带的微观自组织结构, 它反映了岩浆成矿热液在交代围岩(碳酸盐)形成矽卡岩过程中的时—空幂律分布规律。如果该矿床的分带性和成矿区带的空间分布等表现出一种大范围的宏观有序性, 那么矿物晶体中成分环带和某些成矿元素(如 Sn, W, Bi)分布的规则起伏则是一种微观有序性的表现。本研究将阐明这种宏观有序性和微观有序性在柿竹园矿床表现出的相似性, 即具有分形的特点。

1 实验及资料分析

在柿竹园矿区 490 m 中段、514 m 中段、558 m 中段及野鸡尾、金船塘、蛇形坪、横山岭、百步垅等矿区采集了各种矿石和岩石标本, 磨制了相应的光薄片, 进行了光学显微镜观察, 在此基础上选择了 5 件石榴子石及 1 件符山石、1 件绿帘石进行了电镜和探针成分分析, 共分析了 400 多个点的成分, 并拍摄了相应的电子显微镜和光学显微镜照片。

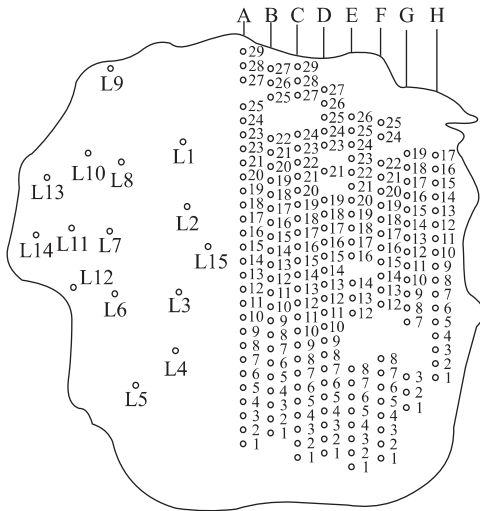
图 1 A₇ 石榴子石电子探针分析位置

Fig. 1 Location of electron microprobe analysis at garnet A₇
右半部行距 20 μm, 点距 10 μm, 局部由于有裂隙未分析

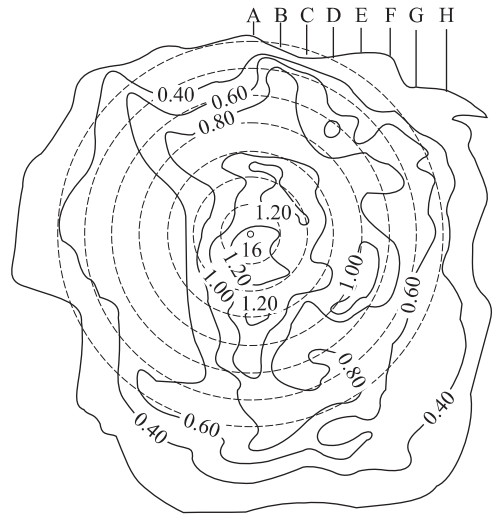
图 2 A₇ 石榴子石 SnO₂ 面分布等值线

Fig. 2 Isoleth of SnO₂ mass fraction at garnet A₇

1.1 样品 A₇ 石榴子石

该样品采自柿竹园矿区 490 m 中段, 岩性为含矿深色块状石榴子石砂卡岩, 主要由石榴子石组成。石榴子石自形程度较好, 最大结晶颗粒在 3 mm 左右, 镜下呈棕色, 由于色调上的差异而显示环带。该块状砂卡岩后期遭受两次蚀变矿化作用: (1) 后期砂卡岩细脉。细脉宽 1~3 mm, 主要由深棕色石榴子石组成, 他形居多, 其他矿物有绿帘石、角闪石等, 并有白钨矿等产出; (2) 石英—萤石—磁铁矿组合。以交代和充填的形式产出, 可见其交代早期的石榴子石。

选择了一颗未受后期交代作用的石榴子石, 颗粒直径 330 μm, 以中间为起点, 行距 20 μm, 点距 10 μm, 对其右半部进行了电子探针成分分析, 共分析了 180 个点, 左半部分亦随机分析了 15 个点, 分析点位置见图 1。根据探针成分分析和照片观察, 对该样品分析的结果归纳如下:

(1) $w(\text{SiO}_2) = 35.02\% \sim 38.00\%$, 变化量 2.98%; $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 4.70\% \sim 9.93\%$, 变化量 5.23%; $w(\text{TFe}_2\text{O}_3) = 18.78\% \sim 24.42\%$, 变化量 5.64%; $w(\text{MnO}) = 0.72\% \sim 4.20\%$, 变化量 3.48%; $w(\text{CaO}) = 27.67\% \sim 33.55\%$, 变化量 5.88%; $w(\text{SnO}_2) = 0.32\% \sim 1.42\%$, 平均 0.80%, 变化量 1.10%。(2) 该石榴子石属钙铁石榴子石, 计算的晶体化学式为:

$(\text{Ca}_{2.5-2.9}\text{Mn}_{0.1-0.3}\text{Fe}_{0.1-0.2}^{2+})(\text{Fe}_{1.3-1.5}\text{Al}_{0.5-0.7})(\text{SiO}_4)_3$, 即钙铁榴石 (Ad) 分子占 65%~75%, 钙铝榴石 (Gt) 分子占 25%~35%, 铁铝榴石 (Alm) 分子占

0%~3%, 锰铝榴石分子 (Sp) 占 3%~10%。(3) 光性环带和成分环带均有一定的显示, 但不明显, 环带主要由 $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TFe}_2\text{O}_3$ 含量变化而引起。(4) 195 个成分点测试结果表明, 该石榴子石各处均含元素 Sn, SnO₂ 的面分布等值线见图 2。

下面讨论 Sn 元素的分布和分形特征。以石榴子石 SnO₂ 质量分数最高点 (号 A-16) 为圆心, 以 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 μm 为半径 (图 2 中虚线表示) 统计各圆中不同质量分数的面积 (以 1 mm × 1 mm 为单位), 求得二维 SnO₂ 质量分数参数 $f_a = \sum a_i S$, 其中 a_i 为 SnO₂ 面分布等值线值, 分别为: 1.2%, 1.0%, 0.8%, 0.6% 及 0.4%, S 为某一等值线范围内的面积, 并计算相应的 $\ln R$ 和 $\ln f_a$ 。测量和计算结果见表 1。用 $\ln f_a - \ln (R/\mu\text{m})$ (离 SnO₂ 丰度最高处距离) 作图, 其结果为一直线 (图 3), 得知 Sn 元素在该石榴子石中的分布为一分形。由直线斜率得到的分形维为 1.68。与 $f_a(R) \propto R^D$ 幂函数求得分形维 (D) 平均值 1.74 (表 1) 吻合。

1.2 样品 A₁₅ 及 A₂₂ 等石榴子石

样品 A₁₅ 及 A₂₂ 分别采于柿竹园矿区 514 m 中段和 536~558 m 中段间。共分析了 16 和 36 个点 (分析结果略)。样品 A₁₅ 的光性和成分环带不明显, 有后期萤石交代, 经计算石榴子石为钙铁榴石, 晶体化学式为:

$(\text{Ca}_{2.75-3}\text{Mn}_{0-0.15}\text{Fe}_{0.01}^{2+})(\text{Fe}_{1.14-1.49}\text{Al}_{0.86-0.51})(\text{SiO}_4)_3$ 。

A₂₂ 石榴子石具光性环带和明显的不规则成分环带, 较明显地反映了粘滞状流体的渗透交代作用

表 1 A₇ 石榴子石的分数维参数

Table 1 Parameters of fraction-dimension at garnet A₇

R/μm	ln(R/μm)	f _a	ln f _a	D
20	2.9957	184	5.2149	1.74
40	3.6889	632.8	6.4501	1.75
60	4.0943	1286.8	7.1599	1.75
80	4.3820	2106.7	7.6529	1.75
100	4.6052	2966.5	7.9951	1.74
120	4.7875	3823.6	8.2489	1.72
140	4.9416	4752.6	8.4664	1.71

$$D = \ln f_a / \ln(R/\mu m).$$

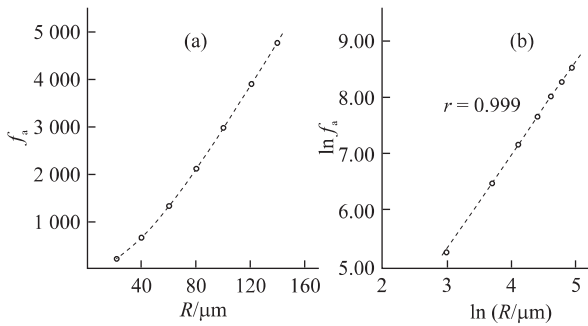
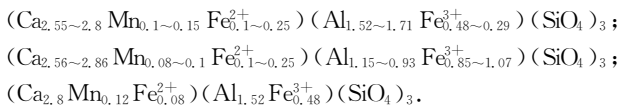


图 3 f_a—R 和 ln f_a—ln(R/μm) 关系

Fig. 3 Relations of f_a vs. R and ln f_a vs. ln(R/μm)

和矿物的不平衡结晶沉淀现象。该石榴子石按成分可简单分为 3 部分:中心(钙铝榴石)、过渡带(钙铁铝榴石)和外围边(钙铝榴石),计算的晶体化学式:



在 A₁₅ 和 A₂₂ 石榴子石中 Sn 元素的分布,总体而言,由内向外呈波状起伏升高(A₁₅: SnO₂ 质量分

数由 0→0.55%, A₂₂: 由 0→0.18%),反映了该矿床形成时含矿热液的脉动性。

样品 B₁ 石榴子石采自野鸡尾,为含铁钙铝榴石,该样品在光学显微镜下未显环带(图 4a),在电镜背散射成分像中显示出明显的成分环带(图 4b)。w(SnO₂)为 0.18%~0.38%。样品 C₅ 石榴子石采自千里山花岗岩体西侧金船塘矿区,测试结果亦为含铁钙铝榴石,在光学显微镜下有光性异常,电镜下成分环带不明显。SnO₂ 质量分数变化范围 0.04%~0.34%,与 A₁₅ 和 A₂₂ 石榴子石一样,由内向外呈波状起伏升高。

以上 4 件样品中 Sn 元素的分布特点与样品 A₇ 中 Sn 元素分布中间高边缘低的现象是完全不同的,指示了 Sn 等成矿过程的间断性阵发现象。

对于其他具环带的矿物符山石、绿帘石等,也进行了详细微区成分分析和计算,限于篇幅,本文不作论述。

2 Sn 元素分布特征的讨论

为了便于分析和对比,把上述分析结果简单列于表 2。

对柿竹园矿床不同部位块状矽卡岩石榴子石的研究结果,可得到以下的结论:

(1) 该矿床不同部位(矿区)块状矽卡岩石榴子石均具有环带结构。环带有两种形式:一种是光性环带,另一种是成分环带。样品 A₇, A₂₂ 既具有光性环带,又具有成分环带; A₁₅ 具萤石交代环带, B₁ 不具

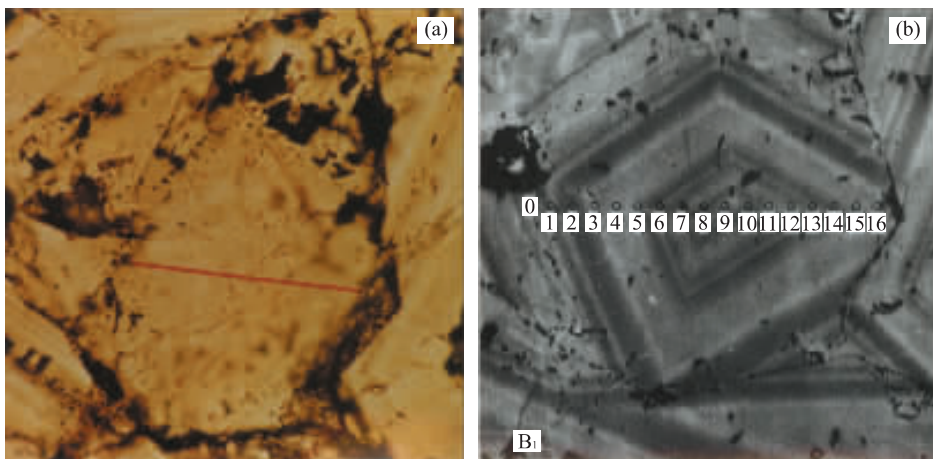


图 4 样品 B₁ 的显微镜照片(a)和电子显微镜背散成分像(b)

Fig. 4 Micrograph (a) and electron-micrograph (b) of garnet B₁

a. 放大倍数 275×, 单偏光, 中黑线示分析点位置; b. 成分环带十分清楚, 照片中标明了分析点的位置, 分析长度 160 μm

表 2 5 件样品分析结果

Table 2 Analyzed results of 5 samples

样号	A ₇	A ₁₅	A ₂₂	B ₁	C ₅
采样位置	490 m 中段	514 m 中段	标高 547 m	野鸡尾	金船塘
分析点数	195	16	36	16	44
矿物种属	钙铁石榴子石	钙铁石榴子石	钙铁—铁铝石榴子石	钙铝石榴子石	钙铝石榴子石
SiO ₂	35.02~38.00	34.08~38.06	36.81~39.24;37.01~39.53	36.61~38.47	36.41~38.84
Al ₂ O ₃	4.70~9.93	4.50~8.65	9.07~12.11;14.07~19.19	14.95~19.83	12.63~16.54
TFe ₂ O ₃	18.78~24.42	19.64~23.85	15.67~21.42;7.47~13.38	10.80~14.77	9.27~14.50
MnO	0.72~4.20	0.00~2.25	1.21~3.96;1.50~2.25	2.14~3.88	0.60~1.73
CaO	27.63~33.55	30.92~33.75	32.06~33.53;29.51~33.35	29.62~32.26	32.21~33.97
SnO ₂	0.32~1.42, 平均 0.80	0.21~0.55, 平均 0.31	0~0.18, 平均 0.11	0.18~0.36, 平均 0.24	0.04~0.34, 平均 0.13
TiO ₂	微量	微量	0.06~1.29, 平均 0.60	微量	0.28~0.9, 平均 0.53
W, Bi	微量, 不稳定	微量, 不稳定	微量, 不稳定	微量, 不稳定	约有一半的点含微量

氧化物和 W, Bi 的单位均为%。

光性环带, 而具明显的微细成分环带; C₅ 具光性环带. 从探针微区成分分析结果来看, 形成环带的主要原因是石榴子石中主元素 Fe 和 Al 质量分数有明显的差异. 一般来讲 Fe 质量分数高, 光学显微镜显示色调偏褐的环带, 而电子探针背散射图像中显示亮度较高的环带. 样品 B₁ 显示完好的细微成分环带, 而不显示光性环带, 从成分数据分析, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化范围 4.88%, $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 变化范围 3.70%, 与 A₇, A₂₂, C₅ 样品比较, 仅 $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 变化小 (2%±), 因此, 并不能认为形成光性环带主要由成分不同而引起, 应该说石榴子石晶体结构的差异是造成光性的主要原因. 石榴子石矿物的环带结构, 无论是光性环带或是成分环带均可认为是一种有序结构, 反映了空间上的有序性. 这种空间上的有序性暗示了成岩成矿过程中矿化作用在时间上的有序性. 以样品 B₁ 为例, 电镜下可分辨出 13 个成分环带, 最宽 15.7 μm, 最窄仅 0.9 μm, 这意味着至少有 10 多次有成分差异的含矿硅铝质流体与围岩(灰岩)发生了渗透交代作用. 形成环带的影响因素十分复杂, 从热液流体考虑, 包括其成分及梯度、化合物形式、挥发份含量、温度、压力等; 从围岩考虑, 包括表面积(粒度、裂隙的形态和量)、温度、流体的速度及停顿时间、Ca 离子的溶解度、溶解速度、pH 值、反应的累计时间等. 因此要正确地求出石榴子石每一个环带的形成时间是一个不太容易解决的问题. 根据 CaCO₃ 在硅铝质溶液中的溶解速度实验^[4], 於崇文等^[5]关于饱和热液离开花岗岩进入灰岩通道生成钙铝榴石的计算机模拟计算, 以及周文戈等^[6]关于变质作用过程中石榴子石生长与时间和温度的关系, 同时考虑到硅铝质热液与 CaCO₃ 反应生成石榴子石时, 存在

地球化学障等因素, 粗略估算一个直径为 170 μm 的完好石榴子石晶出的时间大约为 $(2\sim 10) \times 10^5$ a, 柿竹园矿床的同位素年代学资料表明, 该矿床矿化蚀变作用持续了几十个 Ma, 对于上述石榴子石晶出的时间是可以接受的. 这种估算表明 B₁ 样品的 13 个环带所形成的时间在 $(2\sim 10) \times 10^5$ a, 说明了千里山花岗岩饱和热液活动的持续性和波动性.

(2) 柿竹园多金属矿床块状矽卡岩钙质石榴子石随着离花岗岩体距离的增加, 从钙铁榴石向钙铝榴石变化(表 3). 矿床块状矽卡岩钙质石榴子石的成分变化, 反映了早期含矿硅铝质流体富含铁, 后期铁质含量明显减少; 石榴子石晶体的环带结构中 Fe—Al 量的变化, 指示了含矿硅质流体多次脉动侵入时成分上的变化, 从这个角度来看, 千里山花岗岩的成矿作用是复杂和持久的. 如果把 Fe 也作为一种成矿元素(柿竹园矿床未形成铁矿床), 那么随着成矿热液与围岩交代作用的持续, 也逐渐消耗, 因而远离岩体的块状矽卡岩中的石榴子石以钙铝石榴子石为主.

(3) 柿竹园矿区 A₇, A₁₅ 和 A₂₂ 3 件石榴子石中 $w(\text{SnO}_2)$ 的平均值分别为 0.80%, 0.31%, 0.11%, 用坑道和钻孔资料得到 3 件样品的采样位置离斑状黑云母花岗岩的距离分别为 42 m, 64 m 和 99 m. 以石榴子石产出的位置距岩体的距离为横坐标, SnO₂ 质量分数作为纵坐标作图(图 5). 如果把距离和 SnO₂ 质量分数取对数作图, 则 3 个点为一直线(图 6). 一元回归的相关因子 $r=0.9999$, 这说明在块状矽卡岩钙质石榴子石中成矿元素 Sn 的质量分数与离岩体的距离间的关系具幂律函数关系. 前面在讨论样品 A₇ 石榴子石中 SnO₂ 的分布时, 业已证明: 在微区(μm 级)范围内, Sn 的质量分数与石榴子石

表 3 5 件石榴子石主要端元组分质量分数
Table 3 End-member mass fractions of 5 garnets

样品号	采样地点	Ad	Gr	Alm	Sp	备注
A ₇	柿竹园 490 m 中段	52.5~75.0	25.0~47.5	0.0~3.3	3.3~10.0	
A ₁₅	柿竹园 514 m 中段	57.0~74.5	25.5~43.0	0.0~3.3	2.3~5.0	
A ₂₂	柿竹园 547 m(标高)	45~55 15~25	45~55 75~85	1.7~8.3 1.6~8.3	3.3~6.6 3.5~5.0	交生
B ₁	野鸡尾	10~28	72.5~87.5	3.3~10.0	3.0~8.7	
C ₅	金船塘	25~40	60~75	0.0~3.3	1.6~3.3	

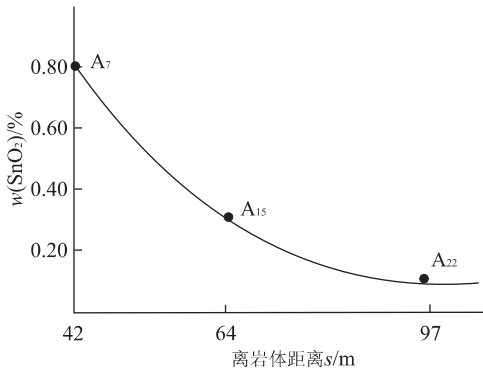


图 5 块状矽卡岩钙质石榴子石中 SnO₂ 质量分数与距岩体距离关系

Fig. 5 Relation between mass fraction of SnO₂ in garnet and distance from granite body

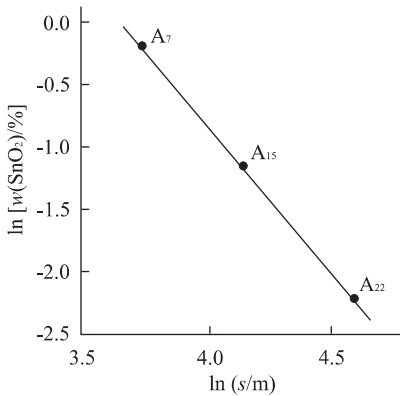


图 6 $\ln(s/m) - \ln[w(SnO_2)/\%]$ 关系

Fig. 6 Relation between $\ln(s/m)$ and $\ln[w(SnO_2)/\%]$

中 Sn 质量分数最高处的距离之间的关系为幂函数关系。这种微观(μm 级)与宏观(几十 m) Sn 元素的分布规律从统计学上看有惊人的相似性,均具有幂函数关系,证明了在柿竹园矿床成矿元素 Sn 的运输和分布具有分形时—空结构特征。

(4)实验和计算表明,二维空间上 Sn 元素的分布具分形特征,而 A₁₅, A₂₂, B₁ 和 C₅ 4 件样品 Sn 质量分数的线性分布却显示出波状起伏似正弦波韵律,这从

微观上指示出柿竹园矿床成矿系统自组织临界性。

3 结论

中国湖南柿竹园超大型多金属矿床的地质成矿系统是极其复杂的,表现为多层次,多子系统。本研究从矿物晶体微观成分的研究证实,巨系统常处于临界状态,当其受到扰动,就会产生响应,通过间断性阵发—平衡(相对静止)的往复而复归临界状态,这种自组织的临界状态是该矿床动力学的最基本特点。

在整个研究过程中得到於崇文院士、沈镛立教授、岑况教授的帮助,并得到湖南柿竹园矿的多位工程师的帮助,在此致以谢意。

参考文献:

- [1] 毛景文. 超大型钨多金属矿床成矿特殊性——以湖南柿竹园矿床为例[J]. 地质科学, 1997, 32(3): 351~363.
- [2] 王昌烈, 罗仕徽, 胥友志, 等. 柿竹园钨多金属矿床地质[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [3] 王书凤, 张绮玲. 柿竹园矿床地质引论[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1988.
- [4] 张荣华, Hellmann R. 矿物在热液内化学动力学和物质迁移[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [5] 於崇文, 岑况, 鲍征宇. 热液成矿作用动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
- [6] 周文戈, 侯渭, 赵志丹, 等. 玄武岩—榴辉岩相变初期的石榴子石生长[J]. 矿物学报, 1999, 19(4): 413~417.

FRACTION-DIMENSIONAL TIME-SPATIAL STRUCTURE OF MULTI-METALLIC DEPOSIT IN SHIZHUYUAN: MINERALIZED Sn AND OTHER ELEMENTS IN GARNET AS AN EXAMPLE

Lu Qi Liu Huifang

(Test Center, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The W, Sn, Mo, Bi multi-metallic deposit in Shizhuyuan, Hunan is a very large deposit. Its mineralized system is very complex, containing multilayers and many subsystems. By micro-area chemical analysis, the distribution of Sn, W, Bi in the garnet of massive skarn is studied. It is confirmed that the contents of Sn and other elements possess the characteristics of power-rate in macro-scale and micro-scale, i. e. fraction-dimensional time-spatial structure. The fraction-dimension of Sn is 1.7 in garnet, 1.8 in vesuvianite, and 1.9 in anaphase epidote. From the micro-distribution characteristics of mineralized elements in mineral crystals, mineralized large-system was always critical, when it was disturbed, it would return to critical state by discontinuously reacting-equilibrating, this type of self building-up critical state is the fundamental dynamic characteristics of the deposit.

Key words: garnet; distribution of Sn; fraction-dimensional time-spatial structure; Shizhuyuan multi-metallic deposit.

(上接 117 页)

音乐;④动画. 二维动画使用 Director 4.0 进行设计制作, 三维动画采用 3D Studio 4.0 设计制作;⑤视频. 视频搜集、选择、采集和编辑.

3 主要成果

(1) 研制完成了一套宝石学多媒体教学软件. 在国内宝石界, 由专业教师与计算机技术人员密切配合, 首次利用计算机多媒体技术对宝石学的基本内容进行素材搜集、归纳和综合整理, 开发成内容全面、功能完善、控制灵活、简便易用、形象生动的计算机多媒体教学软件. (2) 对教学内容及其表达方式进行了设计. 软件教学内容设计丰富多彩, 系统结合宝石学的学科特点和教学内容需要, 共设计了六大功能模块, 科学、艺术地将各类教学素材有机地结合起来进行重塑和屏幕再造, 在计算机中形成具有生动表达方式的教学内容. (3) 创造了新形式的教学内容. 系统在“合成宝石”模块和其他部分模块中, 利用

三维、二维动画重点解决了内容抽象、过程复杂、课堂上难以讲授和理解以及传统教学手段不易表达的问题. (4) 建立了新型的、现代化的宝石学教学环境. 系统在分析的基础上, 结合宝石学教学特点, 设计了方便、快捷、操作性强的交互功能, 促使学习者主动探索式学习, 打破了传统的被动灌输式学习, 提高了学习效率. (5) 完成了大量的宝石学内容的信息化工作. 项目开发过程中, 约 2 400 幅与宝石学相关的图片经数字化成为计算机图像, 软件中使用了 825 幅, 形象直观地展示了项目的开发内容, 也为宝石学学科的信息化和教学科研的进一步发展奠定了良好的资源基础.

参考文献:

[1] Perry P. 多媒体开发指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.