

# 热液成矿分带的自孤子特征

徐德义 於崇文 鲍征宇

(中国地质大学 湖北 武汉 430074)

**摘要** 在研究了银山和铜厂等矿床分带规律的基础上,总结出热液成矿分带特征,并应用非线性科学中的自孤子理论定性地给出了热液成矿系统的属性,指出热液成矿系统是活性扩散系统,热液矿床是活性扩散系统中的自孤子,热液成矿分带具有静态径向对称自孤子特征,是嵌套式径向对称目标斑图。利用具体的反应-扩散方程模拟出的结果加以验证。

**关键词** 热液成矿分带 自孤子 目标斑图 反应-扩散方程

## The Autosoliton Feature of Hydrothermal Ore Zoning

XU Deyi YU Chongwen BAO Zhengyu

(China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074)

**Abstract** By investigating characteristics of some real deposits like Yinshan and Tongchang, the authors have summed up the features of hydrothermal ore zoning, qualitatively described the mechanism of the hydrothermal ore-forming system by application of the theory of autosoliton in nonlinear theory, and pointed out that the hydrothermal ore-forming system is a kind of active system with diffusion and hydrothermal deposits being autosolitons in it. It is found that hydrothermal ore zonations have features of static radially symmetric autosolitons and assume nested radially symmetric patterns. The authors' simulation results have well justified such viewpoints.

**Key words** hydrothermal ore zoning pattern autosoliton autosoliton reaction-diffusion equation

热液矿床普遍存在着分带现象,研究矿床分带的特征,一方面是成矿动力学的理论课题,另一方面矿床的分带性质对指导生产有着重要的意义。在此用非线性科学的方法对热液矿床分带问题进行初步探讨。

### 1 热液成矿分带的特征

於崇文等(1998)对银山矿床和铜厂铜矿床的分带特征进行了综合研究,通过进一步分析得到热液成矿分带具有径向对称性,在空间形态上表现为矿化和蚀变具有同心圆柱体或同心球体特征。

江西银山矿床50 m中段矿化和蚀变分带表现出近似以3<sup>#</sup>岩体为中心的同心环状结构(於崇文等,1998)。从岩体出发的水平任意方向的半射线所穿过的岩体的矿化蚀变特征和元素组合等都具有相似性。其中段和纵剖面上的分带具有相同的特征。

铜厂铜矿床综合纵剖面(《江西银山铜铅锌金银矿床》编写组,1996)的空间形态呈倾向NW的同心圆柱状体。在水平切面图上矿体呈“环形”;在平行斑岩体轴线方向的剖面图上,矿体呈倾斜的“梭形”;在垂直斑岩体轴线的横剖面图上,上接触带矿体呈“鞍形”,下接触带矿体呈“船形”。

热液成矿分带是矿体金属分带和围岩蚀变分带的统一整体,其径向对称性在一维空间(过系统中心的直径上)表现为分层结构,即过系统中心的任一直径被成矿和蚀变类型分成以原点为对称点的对称区间,在相应的对称区间上成矿物质的分布及含量以及围岩蚀变的类型等具有相同性或相似性;在二维空间(成矿区域的过中心的水平截面或垂直截面)上表现为斑点或环状结构,在同一环带上的成矿物质、组合及蚀变类型等具有相同性或相似性,在不同的环带上有较明显的区别,往往表现为元素成分及组

合形式的不同,在相邻两环带间金属矿物的类型及含量有较明显的不连续性,在三维空间往往表现为凝块或嵌套空心球状结构,或嵌套圆柱体状结构。

於崇文(1999)应用复杂性耗散结构理论对热液成矿的动力学机制进行了深入研究,指出成矿分带是近平衡系统中的远离平衡局部区域,是开放系统中的局域化耗散结构,并且是一种典型的弱混沌,准规则相干结构。此次研究中在此基础上概括出如下热液成矿分带的定义和特征。

热液成矿分带是热液成矿作用在时间上演化,并在空间上展布的一种时-空有序结构。具有4种一般特征:①热液成矿分带通常是指矿体金属分带和围岩蚀变分带的统一整体,在空间上表现在矿物或化学元素组合的顺序带状分布;②每一分带内成分基本保持定常,但整体上各分带的成分发生顺序的规律变化;③相邻分带间的边界两侧常发生成分不连续(跳跃或间断);④热液成矿分带整体上常表现出一定程度的径向对称性或目标斑图结构(Vasil'eva, 1960)。

由此,得到热液矿床是活性分布介质中的自孤子(简称为AS),热液成矿分带的径向对称性是静态径向对称自孤子。

## 2 自孤子理论简述

在广泛的物理学、化学、生物学等活性系统中存在着相互竞争的2个过程,即活化过程和抑制过程,具有正反馈的活化剂物质的自复制受制于具有负反馈的抑制剂物质的增长。具有这样过程的系统称为活性扩散系统。活性扩散系统可以产生多种自孤子以及更复杂的耗散结构和自动波。

非线性现象在保守非线性介质中表现为各种各样的非线性振动和非线性波,包括孤立波或称为孤子。在开放非平衡耗散系统中表现为自振动,自动波和自孤子。

自孤子是非平衡系统的最简单宏观局部激活状态。是复杂非均一宏观状态的最基本的组成部分。这些“宏观粒子”的非平凡性质是用来研究现实世界中活性分布介质中的自组织和湍流等错综复杂斑图的有力工具(Kerner等,1989a,1990,1991)。

自孤子产生于近平衡系统中,是近平衡系统中出现的远离平衡的稳定局域结构。非平衡系统也称为活性系统,构成活性系统的物质称为活性介质。产生自孤子的活性系统是活化过程和抑制过程共存的动力系统。系统的决定活化过程强弱的参数或者

参数组合称为活化剂,决定抑制过程强弱的系统参数或参数组合称为抑制剂。

自孤子是非平衡系统的内禀稳定孤立状态。自孤子的参数(形状、振幅、速度、脉动频率等)完全由系统参数决定,不依赖于导致这一特定自孤子首次产生的初始扰动的性质。

强度充分大,持续的时间足够长的外部的局部刺激可以激发稳定系统中自孤子的产生,某种自孤子可以在初始扰动移去后自发地产生。由此看来,自孤子的形成可以看作是一个自组织现象。

虽然系统中的自孤子存在于不同的物理过程,但在绝大多数情况下可以归结为以下2个一般的非线性方程:

$$\tau_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} = l^2 \Delta \theta - q(\theta, \eta, A) \quad (1)$$

$$\tau_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = L^2 \Delta \eta - Q(\theta, \eta, A) \quad (2)$$

其中“源” $q$ 和 $Q$ 是 $\theta, \eta, A$ 的非线性函数,不是坐标和时间的显函数; $\Delta$ 是Laplace算子; $\tau_{\theta}, \tau_{\eta}$ 和 $l, L$ 分别是活化剂 $\theta$ 和抑制剂 $\eta$ 的特征时间和特征长度; $A$ 是分叉参数(或控制参数),是刻画物理系统的非平衡水平的参数。

形式上看,方程(1)(2)是一组自治的半线性抛物型方程,即反应-扩散方程,其等式右端第一项称为扩散项,第二项是反应项。方程描述的是反应物质量的改变,是反应对量的增加与扩散对量的减少之差。反应扩散方程具有很强的—般性,这并不是偶然的,事实上许多物理学、化学和生物学过程模型的方程,如半导体方程、燃烧方程、Belousov-Zhabotinskii反应(简称B-Z反应)方程、Brusslator方程、神经传导方程等都是该类方程的实例(Prigogine, 1955; Vasil'ev等, 1979, 1990; Vasil'eva, 1960; Mikhailov, 1990)。所有这些模型的共同点是,都包含活化剂的正反馈,使得活化剂物质自复制,该过程是受抑制剂控制的,抑制活化剂浓度的增长。

从对活性扩散系统的分析得知,不稳定性的类型取决于量 $\alpha = \tau_{\theta}/\tau_{\eta}$ 和(或) $\epsilon = l/L$ 的大小,也就是活化剂和抑制剂的时间特征和长度特征的关系。 $\alpha$ 和 $\epsilon$ 不仅决定活性扩散系统的均一状态的不稳定性,而且决定该系统的自孤子和其他耗散结构的类型。

由于系统参数和初始扰动的类型不同,自孤子具有3种类型:①静态自孤子:速度为零,形状不随

时间改变;②脉动自孤子:速度为零,而形状随时间作周期性改变;③行进自孤子:以某一不衰减的速度移动,伴有其他更复杂的孤立耗散结构和自动波。

理想均匀分布的介质里耗散结构的自发形成是由于均一状态的分层作用,即由于特定波数( $k \neq 0$ )的涨落生长。这里的活性介质分层作用的发生是由于活化剂的正反馈,活化剂值的增长被具有负反馈的抑制剂控制。在不同的物理、化学和生物系统中活化过程和抑制过程可具有完全不同的性质。静态耗散结构通常形成于抑制过程比活化过程更长的活性分布介质中,即抑制剂的特征长度 $L$ 远大于活化剂的特征长度 $l$ 。此外,均一状态的分层是由于更缓慢的抑制剂不能抑制活化剂的局部涌动。

一般结论是,参数 $\epsilon = l/L$ 越小分层越容易发生。正是条件 $L \gg l$ 促进了耗散结构在广泛的活性分布介质中的形成。

### 3 热液成矿活性扩散系统特征

对自孤子理论和热液成矿系统的特征进行了综合研究,认为该系统具有如下属性和特征:

(1)热液成矿系统是非平衡热力学系统。该系统与外界存在着能量及物质交换,是耗散系统。热液成矿过程是非线性热力学过程,热液矿床分带是一种宏观有序结构,即耗散结构。

(2)热液侵入之前原岩中的物质成分的分布可以近似看成是均匀分布的,即处于均匀的定态,是稳定状态。热液的侵入使得热力学平衡遭到破坏,系统中的元素及物质被激活,使得系统失去稳定性,因此系统是活性系统,当系统的非平衡水平达到临界值时成矿元素开始富集。

(3)热液成矿过程是成矿物质的分离并富集的过程。在这一过程中成矿物质的富集是活化过程,成矿元素及其组合称为活化剂,运矿与控矿元素及其组合称为抑制剂。成矿元素的富集被运矿和控矿元素的运移所抑制,因此热液成矿过程是活化过程与抑制过程竞争的过程。成矿元素在局部的富集并形成分带是成矿热液的非线性脉冲和环境介质的线性弥散取得平衡而形成相干结构(於崇文,1999)。脉冲起聚拢作用,弥散起扩散作用。成矿过程范围小,时间短,运矿与控矿元素决定围岩的蚀变过程,围岩蚀变过程范围大,时间长,因此热液成矿系统是 $K\Omega$ -活性扩散系统。按照系统的非线性特征可以把热液成矿系统归结为 $K\Omega\Lambda$ -活性扩散系统或 $K\Omega\Lambda$ -活性扩散系统(Kerner等,1989a)。

(4)热液的侵入是外部对近平衡稳定状态局部的刺激(扰动)。强度充分大、持续时间足够长的外部的局部刺激结束后,当非平衡水平超过临界值时,成矿元素开始富集,表现为近似均匀的围岩局部成矿物质浓度的急剧增加,这正是自孤子的特征,一般称热液成矿这一结构特征为热液成矿自孤子。

(5)热液成矿自孤子是热液侵入后在非平衡定态中自发形成的(是一种自组织现象),其结构(成矿物质的浓度、成矿物质的排列组合和分布形式等)完全由系统本身确定,热液侵入的不同属性只决定产生自孤子的不同类型(静态、脉动和行进自孤子等)。

(6)像其他自孤子一样,热液矿床自孤子可以用2个反应-扩散方程的方程组来描述。通过分析认为矿化作用是热液侵入后在非平衡定态中自发形成的,热液成矿分带的径向对称结构可以归结为三维活性扩散系统基本方程的静态径向对称自孤子解。

(7)多种形状的自孤子可存在于二维和三维系统中,其中最简单的是斑点、凝块、环状或空心球状的径向对称自孤子,以及嵌套环和嵌套空心球状自孤子。热液成矿的径向对称结构就是嵌套圆柱和嵌套空心球状径向对称自孤子,是简单形状的热液成矿自孤子(凝块)的演化(重构)的结果。局部中断是自孤子的自组织作用,凝块状热液自孤子中心的局部中断(成矿元素浓度的崩塌式的下降)是由于自孤子外围边界成矿元素浓度的振荡所致,使得自孤子分裂形成空心圆柱体或空心球体,分裂反复进行,分裂的自孤子最终充满整个成矿系统,形成嵌套结构。

(8)多种不同的自孤子可以存在于同一个成矿系统中,可以进行复杂的演化和非线性相互作用,产生复杂的耗散结构,因此现实中的热液矿床形态多样,且结构复杂。

在活性扩散系统中可产生各种形式的自孤子,更复杂的耗散结构和自动波。可以认为,具有径向对称性的热液成矿分带和蚀变分带就是热液成矿活性扩散系统中产生的径向对称自孤子。在热液侵入的过程中系统就有元素的分布及组合的改变,强度足够大,时间足够长的热液侵入后就有成矿元素的富集发生,但成矿元素的富集速度是由化学反应速度以及环境介质的弥散速度决定的,其中化学反应给成矿元素的富集提供正反馈,其速度远远快于环境介质的弥散速度,成矿元素的富集是热液侵入之后自发形成的。笔者认为,矿化和蚀变过程是在非平衡定态中进行的,在此假设下可将成矿分带和蚀变分带的径向对称结构归结为静态对称结构。

### 4 数值模拟结果

一般在非平衡定态的活性扩散系统中,基本方程(1)(2)可归结为一维静态的情况:

$$l^2 \frac{d^2 \theta}{dx^2} - q(\theta, \eta, A) = 0 \quad (3)$$

$$L^2 \frac{d^2 \eta}{dx^2} - Q(\theta, \eta, A) = 0 \quad (4)$$

注意到在离矿化和蚀变发生的范围充分远的地方活化剂和抑制剂的值等于原岩中的值  $\theta_h$  和  $\eta_h$ 。因此,  $\alpha(x)$  和  $\eta(x)$  的分布是方程(3)(4)的满足下列边界条件的解:

$$\eta(-\infty) = \eta(\infty) = \eta_h \quad (5a)$$

$$\alpha(-\infty) = \alpha(\infty) = \theta_h \quad (5b)$$

实际情况中,对比矿化作用范围的尺度  $\psi$  和成矿元素富集的范围的尺度  $l$ , 蚀变范围的尺度  $L$  是充分大,即其中的  $\psi \gg L$ ,可假设  $L = \infty$ ,但是矿化作用的范围和成矿元素富集的范围之间应有  $\psi \gg l$  关系。径向对称性分布的边界条件可以是循环边界条件

$$\alpha(-\psi/2) = \alpha(\psi/2), \frac{d\alpha}{dx} \Big|_{x=\psi/2} \quad (6a)$$

$$\eta(-\psi/2) = \eta(\psi/2), \frac{d\eta}{dx} \Big|_{x=-\psi/2} = \frac{d\eta}{dx} \Big|_{x=\psi/2} \quad (7a)$$

或者零边界条件

$$\frac{d\alpha}{dx} \Big|_{x=-\psi/2} = \frac{d\alpha}{dx} \Big|_{x=\psi/2} = 0 \quad (6b)$$

$$\frac{d\eta}{dx} \Big|_{x=-\psi/2} = \frac{d\eta}{dx} \Big|_{x=\psi/2} = 0 \quad (7b)$$

由渐近理论可以推导出问题(3)(4)(6)(7)关于小参量  $\epsilon = l/L$  (或者,更精确地说是  $L \rightarrow \infty$  时)的零级近似可解条件(Kerner等,1989a)

Fife(1976a,1976b)用定性的方法构画出解的形式(图1)。该图描述的是静态宽峰径向对称自孤子(实际情况也可以是静态尖峰自孤子或更复杂形式)

图中  $\theta_i = \theta_{si}$  ( $i = 1, 2, 3$ )是活化剂值的奇异点。当抑制剂给定某个值  $\eta = \eta_s$ ,活化剂在奇异点(相轨线的鞍点)  $\theta_i = \theta_{si}$  ( $i = 1, 2, 3$ )处的值由下列等式确定:

$$q(\theta_{si}, \eta_s, A) = 0 \quad (i = 1, 2, 3)$$

该形式的解一方面描述了活化剂值分布关于原

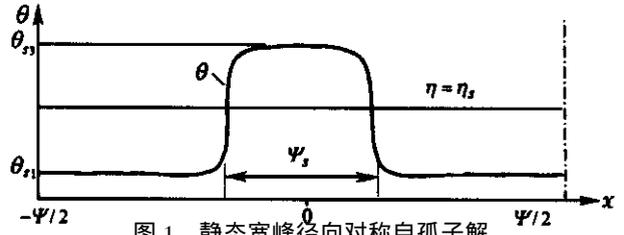


图1 静态宽峰径向对称自孤子解

(据 Fife, 1976a, 1976b)

Fig.1 Solution in the form of broad static radially symmetric AS(after Fife, 1976a, 1976b)

点的对称性,另一方面说明活化剂值  $\alpha(x)$  的解是直线  $\theta = \theta_{s1}$  和  $\theta = \theta_{s3}$  之间的平滑的台阶。一维静态对称结构可看作是热液矿床分带水平截面的任一径向上成矿元素的分布描述。以上定性结果较好地说明了在热液成矿分带的带内成矿元素的分布基本保持定常,带间出现跳跃或间断的分带现象,同时描述了控矿和运矿元素在系统中的分布近似均匀。

二维和三维的情形也有相应的定性和定量描述(Kerner等,1990)。局部中断可以使得二维和三维静态对称自孤子(斑点和凝块)发生分裂而演化成嵌套环和嵌套球状结构,图2是具体模型的数值模拟结果,表现了斑点状结构或凝块状结构及其向嵌套结构演化的过程。

利用 Zhabotinskii 反应-扩散模型(Zhabotinskii, 1974)进行了数值计算和模拟,得到图3所示的嵌套式径向对称的目标斑图<sup>①</sup>。

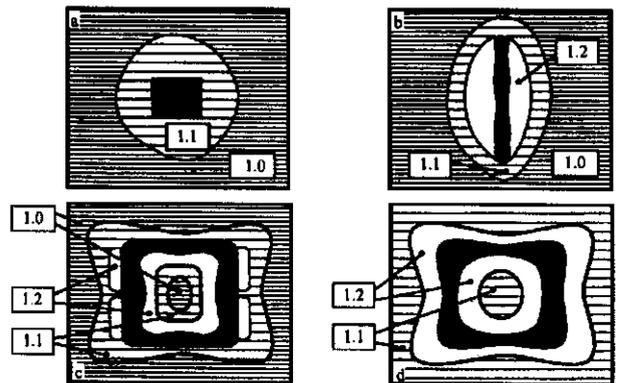


图2 复杂二维自孤子中活化剂的分布模拟

Fig.2 Activator distributions in complex two-dimensional AS 黑色部分为活化剂为 0.1, 1.0 对应的是均匀状态活化剂的值 (据 Balkarei 等,1980)

①图中从黑色到白色表示活化剂量值从最小到最大,step 值表示计算中的循环迭代步骤,具体的计算方法和模拟过程笔者将另文发表。

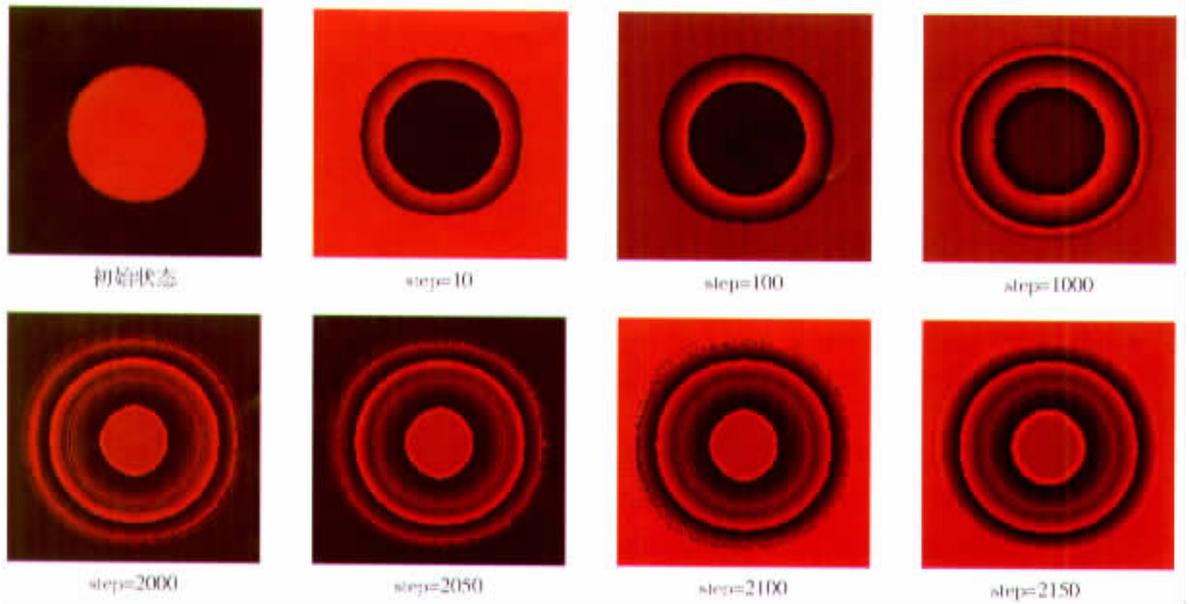


图3 嵌套径向对称目标斑图

Fig.3 Nested radially symmetric target pattern

模拟出的结果与矿床的分带空间形态吻合很好,说明将热液成矿分带的径向对称性归结为径向对称自孤子特征是合理的。

本文只是在机理上初步定性地分析了热液成矿分带的特征及热液成矿系统的属性,该项研究工作尚处在定性描述阶段,定量地研究具体的成矿过程还要做大量细致的工作,解析化尚存在许多的困难。

### 参考文献

- 於崇文等. 1998. 成矿作用动力学. 北京: 地质出版社, 175~188.
- 於崇文. 1999. 大型矿床和成矿区(带)在混沌边缘. 地学前缘, 6(2): 85~229.
- 中国有色金属工业总公司江西地质勘查局《江西银山铜铅锌金银矿床》编写组. 1996. 江西银山铜铅锌金银矿床. 北京: 地质出版社.
- Balkarei Yu I, Evtikhov M G, Elinson M I. 1980. Localized stationary states in two-dimensional diffusion autowave medium (in Russian). Mikroelektronika, 9(2): 144~149.
- Fife P C. 1976a. Pattern formation in reacting and diffusing systems. J. Chem. Phys., 64(2): 544~564.
- Fife P C. 1976b. Boundary and interior transition layer phenomena for pairs of second-order differential equations. J Math Anal Appl., 54(2): 497~521.
- Mikhailov A S. 1990. Foundations of synergetics I. Distributed Active Systems, Springer Series in Synergetics, 51, Springer, Berlin, Heidelberg, N. Y.
- Kerner B S, Osipov V V. 1989a. Autosolitons, Usp. Fiz. Nauk, 157(2): 201~266 [English transl.: Sov. Phys.-Uspekhi, 1989, 32(2): 101~138].
- Kerner B S, Osipov V V. 1990. Self-organization in active distributed media Usp. Fiz. Nauk, 160(9): 1~73 [English transl.: Sov. Phys.-Uspekhi, 33(9): 679~719].
- Kerner B S, Osipov V V. 1991. Autosolitons: localized highly nonequilibrium regions in homogeneous dissipative systems (in Russian). Nauka, Moscow.
- Prigogine I. 1955. Introduction to thermodynamics of irreversible processes. Charles C. Thomas, Springfield (IL).
- Vasil'eva V B. 1960. Asymptotics of solutions of certain boundary problems for equations with a small parameter at the senior derivative (in Russian). DAN SSSR, 135(6): 1303~1306.
- Vasil'eva A B, Butuzov V F. 1973. Asymptotic expansions of singularly perturbed perturbation (in Russian). in: Topics in applied and computing mathematics, Vysshaya Shkola, Moscow.
- Vasil'ev V A, Romanovskii Yu M, Yakhno V G. 1979. Autowave processes in distributed kinetic systems. Usp. Fiz. Nauk, 128(4): 625~666 [English transl.: Sov. Phys.-Uspekhi, 1979, 22(8): 615~639].
- Vasil'eva A B, Butuzov V F. 1990. Asymptotic methods in the theory of singular perturbations (in Russian). in: Topics in applied and computing mathematics, Vysshaya Shkola, Moscow.
- Zhabotinskii A M. 1974. Concentration oscillations (in Russian). Nauka, Moscow.