

文章编号: 1009-6094(2005) 01-0108-05

尾矿坝浸润线时空混沌 及其安全机理*

张春生, 蒋卫东

(江西铜业集团公司, 江西贵溪 335424)

摘 要: 在单向耦合映象格子模型基础上, 考虑尾矿坝坡角因素, 建立了浸润线耦合映象格子模型 $v_{n+1}(i) = (1 - \epsilon)f(v_n(i)) + \epsilon(1 + \sin\theta f(v_n(i-1)))$ 。根据浸润线的初值条件和边界条件, 对该模型进行了非线性动力学分析。结果表明, 浸润线演化存在复杂时空混沌行为, 可分为随机图样流、选择图样流、缺陷传播行为及完全发展湍流 4 种。非线性强度 α 和耦合强度 ϵ 的取值范围较小, 且 ϵ 较小时就可以得到非常丰富的动力学图案。浸润线演化受坡角影响比较明显, 坡角越大越容易出现混沌状态。浸润线的各种时空行为反映了其相应的客观状态, 从而揭示了浸润线的安全机理。浸润线耦合映象格子模型也可以用来解释其他各类边坡的复杂渗流现象。

关键词: 安全工程; 尾矿坝; 耦合映象格子; 时空混沌; 浸润线
中图分类号: O415.5 **文献标识码:** A

0 引言

浸润线是影响尾矿坝安全的重要因素。对浸润线监测数据分析表明, 其长期演化中存在混沌现象。文献[1~5]对此进行了详细的研究。文献[4]提出了用耦合映象格子模型(CMLs)研究浸润线时空混沌的反演问题; 文献[5]则通过引入一个异常因子 η_i , 建立浸润线耦合映象格子模型 $v_{n+1}(i) = (1 - \epsilon)f(v_n(i)) + \eta_i f(v_n(i-1))$, 来描述异常状况下浸润线的渗流演化。对于一般情形下的尾矿坝浸润线演化机理, 目前还没有文献进行研究。但是, CMLs 模型在非线性能湍流^[6]、生态系统演化^[7]、大气动力^[8]、海洋表面大气对流^[9]及液体流动^[10]等方面的研究成果, 对这项工作有所启示。尾矿坝作为典型的边坡, 具有一定的坡角, 其浸润线时空混沌应是在坡角影响下的开流问题; 因此, 本文在考虑尾矿坝坡角的情况下, 提出浸润线耦合映象格子模型(Saturation Line Coupled Map Lattices, 以下简称 SLCMLs), 用以揭示浸润线时空演化的实质及其安全机理, 为尾矿坝管理及分析提供理论参考。

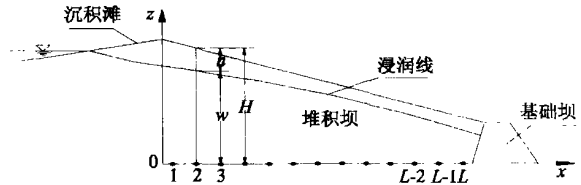
1 浸润线时空演化模型

1.1 浸润线状态场变量

对于浸润线时空混沌系统, 也可分为反应与扩散两个独立的行为。扩散过程可以描述形成浸润线的尾矿库水自坝体上部到下部的流动; 反应过程可以描述对形成浸润线有深刻影响的各种因素的作用, 如尾砂透镜体对浸润线的作用。因此, 可以在单向耦合映象格子模型基础上建立描述浸润线时空混沌的耦合映象格子模型。

以上游法尾矿坝为例(中线法及下游法尾矿坝分析类似), 将垂直坝轴线的纵剖面作为研究对象, 并设计浸润线计

算参数及其一维格点(见图 1)。



h —浸润线降深; w —浸润线高度; H —坝体高度; L —格点长度

图 1 浸润线计算参数及其一维格点

Fig. 1 Calculating parameters of saturation line and its one-dimension lattices

从图 1 可看出, w 、 h 及 H 的关系为

$$H = w + h \tag{1}$$

定义浸润线变化率

$$V = \frac{w}{H} \tag{2}$$

将等间距的点 $1, 2, 3, \dots, L-2, L-1, L$ 作为一维网格点, 每个格点对应 1 个浸润线变化率, 选取格点上的浸润线变化率作为状态场变量。

1.2 浸润线耦合映象格子模型

图 2 为一维反应扩散过程的 3 种情形。对于格点 $i-1$ 、 i 、 $i+1$ 相互间的影响关系及其分析模型如下。

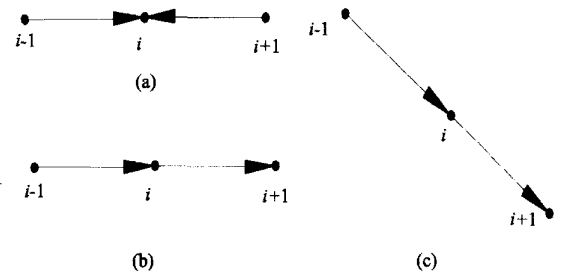


图 2 一维反应扩散过程

Fig. 2 Reaction diffusion of one-dimension

1) 对于图 2(a), 格点 i 受前后两个格点的影响相同, 应用 CMLs 模型进行描述。

$$v_{n+1}(i) = (1 - \epsilon)f(v_n(i)) + \frac{\epsilon}{2}[f(v_n(i-1)) + f(v_n(i+1))]$$

(3)

2) 对于图 2(b), 格点 i 只受前面 1 个格点的影响, 应用 OCMLs 模型进行描述。

$$v_{n+1}(i) = (1 - \epsilon)f(v_n(i)) + \epsilon f(v_n(i-1)) \tag{4}$$

3) 对于图 2(c), 根据水力学原理, 坡角越大格点 $i-1$ 对格点 i 的影响越大。由此, 本文建立浸润线耦合映象格子模型(SLCMLs)。

$$v_{n+1}(i) = (1 - \epsilon)f(v_n(i)) + \epsilon(1 + \sin\theta)f(v_n(i-1)) \tag{5}$$

$0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

当 $\theta = 0$ 时, 式(5)变为式(4)。由此可见, OCMLs 模型是 SLCMLs 模型的特例。考虑倾角影响后, 模型仍是一维的; 倾角只是影响着状态变量的数值。根据上游法尾矿坝坝体轮廓,

* 收稿日期: 2004-07-16

作者简介: 张春生(1956—), 男, 高级工程师, 本科, 从事矿山安全研究。

取当 $\theta = 10^\circ$ 得

$$v_{n+1}(i) = (1 - \epsilon)f(v_n(i)) + 1.174\epsilon f(v_n(i-1)) \tag{6}$$

n 表示离散化后的时间, $f(x)$ 取单峰映象, 即

$$f(x) = 1 - \alpha x^2 \tag{7}$$

其中 α 为非线性强度, 将式 (7) 代入式 (6), 得

$$v_{n+1}(i) = \alpha(\epsilon - 1)v_n^2(i) - 1.174\alpha\epsilon v_n^2(i-1) + 1 + 2.174\epsilon \tag{8}$$

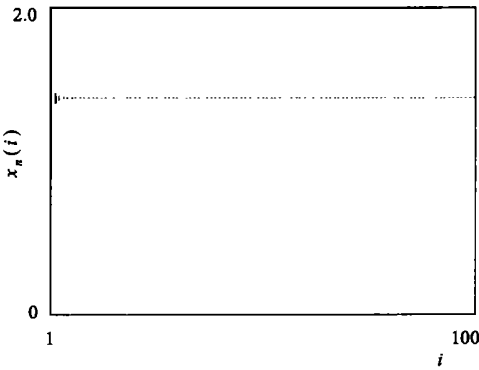
3 非线性动力特性分析

对式 (8) 进行数值计算, 求取 v 。边界条件和初值的选取对时空行为有重要影响, 耦合单峰映象格子中选取周期性边界条件, 即 $v_n(0) = v_n(L)$ 。在开流模型中, 一般只考虑它的第一个格点, 即 $v_n(0)$ 。根据浸润线变化率的定义, 边界条件 $V_1(0)、V_2(0)、\dots、V_{10149}(0)$ 在 0.600、0.601、0.602、 \dots 、0.999 中间由计算机随机选取; 初值 $V_1(0)、V_1(2)、\dots、V_1(100)$ 在 0.800、0.801、0.802、 \dots 、0.899 中由计算机随机选取。这种随机处理的方法是比较合理的。因为耦合映象作为一个高自由度的动力系统, 可能具有多个吸引域结构, 即具有相同物理参数的系统, 由于初始条件不同, 它的最终行为可能是有序的, 也可能是混沌的。对于这种复杂系统, 考虑最多的是在大多数初始条件下, 系统的最终行为趋向哪一类。随机初始化相当于

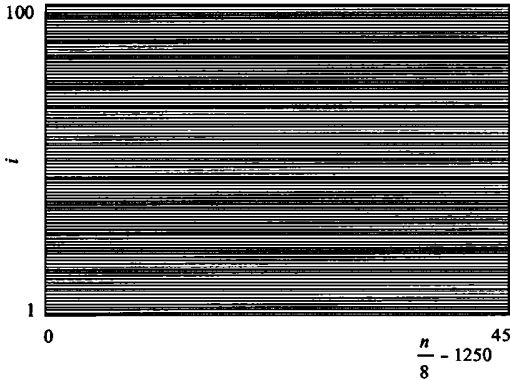
在所有初始条件中随机选取一个, 这样经过足够的过渡过程后, 就很有可能得到所需要的最终趋向^[11, 12]。

对每一个 $\alpha、\epsilon$ 组合进行迭代计算中, 格子的大小为 $L = 100$, 参数区间为非线性强度 0.5 α 1.0, 耦合强度 0.01 ϵ 1.0。最终结果采用空间振幅变化图(space-amplitude plot)和时空行为发展图(space-time diagram)描述。空间振幅变化图用来反映各格点状态的时间变化行为, 它将每个时间步的空间状态画在坐标图上。其纵轴为状态值, 横轴为空间位置, 然后将一些时间步的空间状态函数全部迭加到一张图上。时空行为发展图用来反映一些图案结构在空间的传播行为。在时间和空间分别作为其横轴和纵轴的平面上, 对每个时空点的状态进行判别, 如其大于单个映象的不稳定不动点 $v^* = (\sqrt{4\alpha + 1} - 1)/(2\alpha)$, 则将这个时空点涂黑; 反之, 则让这个点空白。对于空间振幅变化图, 迭代次数 n 为 10 150, 舍去前 10 000 步作为过渡过程, 空间振幅变化图中迭加了最后 150 步时间, 即 10 001~10 150 步时间的空间状态。对于时空行为发展图, n 为 10 360。

当非线性强度 $\alpha = 0.75$, 耦合强度 ϵ 也较小时, 其最终行为是平庸的, 所有格点的状态都落在一个固定值上, 见图 3; 当 $\alpha = 0.75$ 时, 出现倍周期, 见图 4。



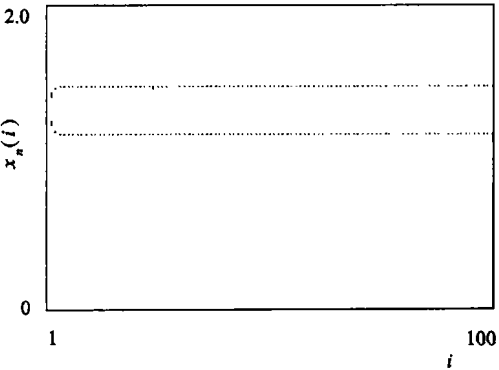
(a) 空间振幅变化图



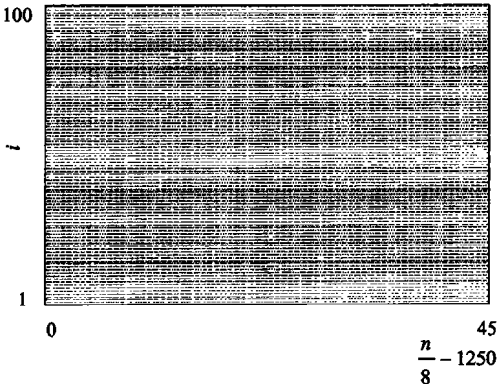
(b) 时空行为发展图

图 3 周期 1 ($\epsilon = 0.16, \alpha = 0.5$)

Fig. 3 Period 1



(a) 空间振幅变化图



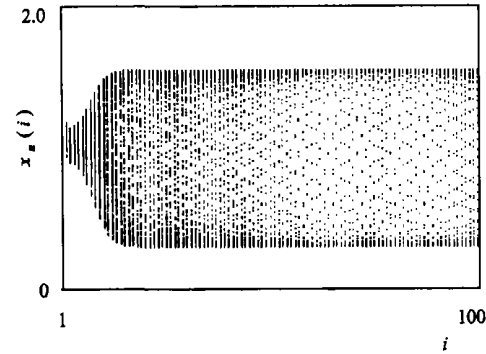
(b) 时空行为发展图

图 4 倍周期 ($\epsilon = 0.03, \alpha = 0.78$)

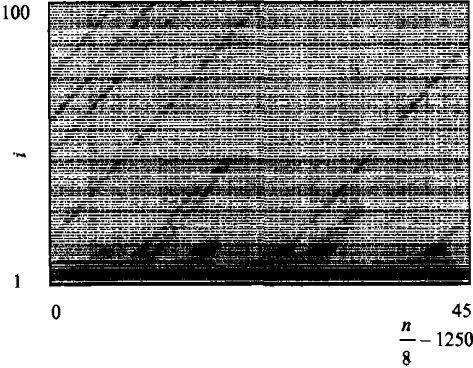
Fig. 4 Period-doubling

经过几步空间周期分岔后,单峰映象的二带混沌性质使空间图案出现随机图样流(flow of random patterns)。随着非线性强度和耦合强度的增大,还先后出现了选择图样流(flow

with selected patterns)、缺陷传播行为(transmission of defects)、完全发展湍流(fully developed turbulent state),分别见图 5~8。



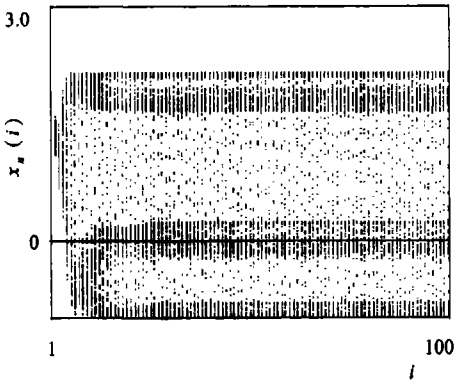
(a) 空间振幅变化图



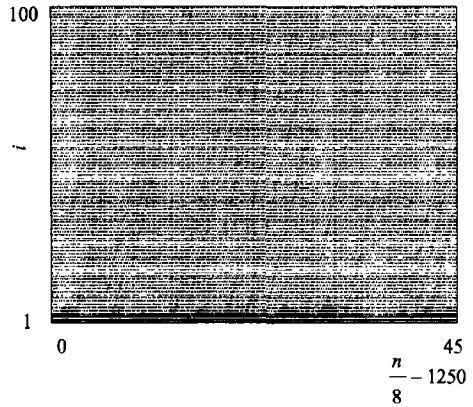
(b) 时空行为发展图

图 5 随机图样流 ($\epsilon = 0.29, \alpha = 0.5$)

Fig. 5 Flow of random patterns



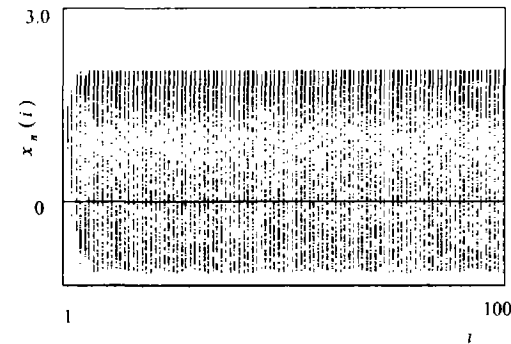
(a) 空间振幅变化图



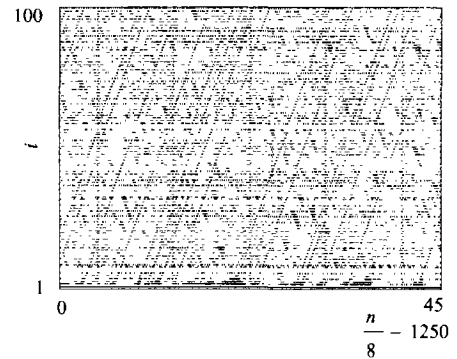
(b) 时空行为发展图

图 6 选择图样流 ($\epsilon = 0.58, \alpha = 0.55$)

Fig. 6 Flow with selected patterns



(a) 空间振幅变化图



(b) 时空行为发展图

图 7 缺陷传播行为 ($\epsilon = 0.70, \alpha = 0.48$)

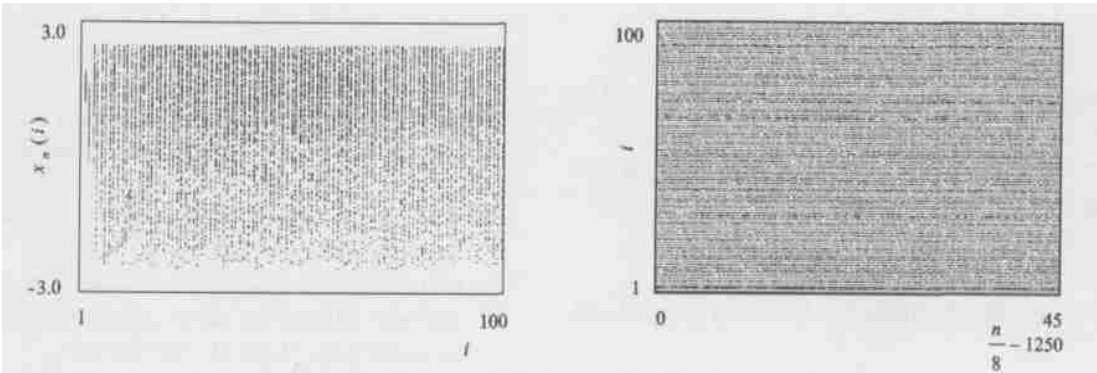
Fig. 7 Transmission of defects

综合上述计算结果,得到式(8)在 $0.5 \leq \alpha \leq 1.0, 0.01 \leq \epsilon \leq 1.0$ 区间上的参数空间相图,见图 9。

图 9 的 SLCLMs 模型参数空间相图中,时空模式种类和耦合单峰映象格子模型基本相同;但分布区域差异较大。它反

映出了浸润线的复杂时空演化,具体表现以下方面。

1) 非线性强度 α 和耦合强度 ϵ 的取值范围受到了限制,即 $0.5 \leq \alpha \leq 1.0, 0.01 \leq \epsilon \leq 1.0$, 比 CLLs 模型的参数取值范围大为减小。这说明当 α, ϵ 值较大时,尾矿坝已经产生了渗流破坏。



(a) 空间振幅变化图

(b) 时空行为发展图

图 8 完全发展湍流 ($\epsilon=0.7, \alpha=0.7$)

Fig. 8 Fully developed turbulent state

2) α 和 ϵ 的作用加大。相对于 CLLs 的参数空间相图, α ϵ 值较小时就可以得到较丰富的动力学图案。这说明浸润线演化较容易进入非线性状态。

3) 在 $\alpha \epsilon$ 较小时, 浸润线演化主要以随机态出现, 即随机图样流。这反映了浸润线在演化过程中, 扩散作用占据了主要地位。

4) 完全发展湍流和缺陷传播行为之间有一个空白区域, 这里出现的是一些周期行为。这说明在 $\alpha \epsilon$ 较大时, 尾矿坝浸润线演化仍能出现稳定的周期态。这是由于浸润线演化在大部分时空上, 仍强烈地受到尾矿排放、大气降水等周期行为的影响。

5) 对于同一个 α 值, ϵ 值 越 小 混 沌 特 性 越 强。耦合强度表示了扩散的有序化趋势。对于浸润线演化来说, 可以指示为一些确定性的作用, 如尾矿排放等。显然这种作用越小, 越容易导致混沌现象的产生。因此, SLCMLs 模型解释了浸润线演化过程中混沌出现的机制。

6) 浸润线演化从周期 1 到倍周期再到混沌的过程, 历态十分复杂。相图中时空行为基本上可分为随机图样流、选择图样流、缺陷传播行为和完全发展湍流 4 种。同时在缺陷传播行为中, 还包含有少量时空阵发混沌。这是由于尾矿堆积坝的复杂沉积过程对浸润线有着深刻影响, SLCMLs 模型通向混沌之路就是尾矿坝复杂沉积过程的反映。

上述分析中 4) 和 5) 表明, 可以通过合适的尾矿坝管理措施, 来抑制混沌的产生, 提高尾矿坝安全度, 文献[2]对这一问题做了深入研究。以下分析坡角对时空行为的影响。分别取 $\theta=20^\circ, \theta=30^\circ$, 依次得浸润线耦合映像格子模型

$$v_{n+1}(i) = \alpha(\epsilon-1)v_n^2(i) - 1.342\alpha\epsilon v_n^2(i-1) + 1 + 2.342\epsilon \quad (9)$$

$$v_{n+1}(i) = \alpha(\epsilon-1)v_n^2(i) - 1.5\alpha\epsilon v_n^2(i-1) + 1 + 2.5\epsilon \quad (10)$$

θ 分别为 $10^\circ, 20^\circ$ 及 30° 时的时空模式见表 1。

从表 1 中可以看出, 随着尾矿坝坡角的增大, 出现非线性动力模式的值相应地减小。这表明, 随着尾矿坝坡角的增大, 浸润线演化越容易出现混沌状态。不断增大非线性强度值进行分析, 可以得到相同的结论。因此, 尾矿坝坡角对浸润线的非线性动力特性有较大的影响。

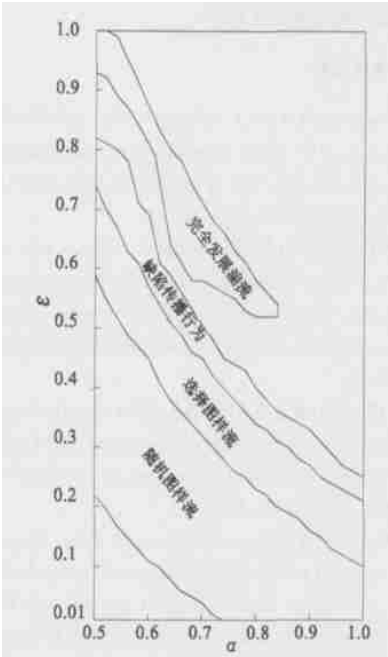


图 9 SLCMLs 模型的参数空间相图

Fig 9 Phase diagram of parameters for model SLCMLs

表 1 $\alpha=0.5$ 时各种时空模式下 ϵ 的取值范围

Table 1 Range of ϵ in every spatiotemporal patterns while $\alpha=0.5$

θ	时空模式				
	周期 1	随机图样流	选择图样流	缺陷传播行为	完全发展湍流
10°	0.01~0.21	0.22~0.59	0.60~0.74	0.75~0.82	0.93~1.02
20°	0.01~0.18	0.19~0.48	0.49~0.61	0.62~0.69	0.85~0.88
30°	0.01~0.17	0.18~0.42	0.43~0.53	0.54~0.61	0.62~0.76

4 结 论

浸润线演化在时间和空间方向上都包含有复杂的非线性动力学行为, 本文主要结论如下。

1) 在 OCMLs 模型基础上, 考虑尾矿坝坡角因素, 建立了浸润线耦合映象格子(SLCMLs)模型

$$v_{n+1}(i) = (1 - \epsilon)f(v_n(i)) + \epsilon(1 + \sin\theta)f(v_n(i-1))$$

$$0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

该模型用于描述浸润线时空演化, 可以涵盖 OCMLs 模型。

2) 在 $\alpha = 1, \theta = 10$ 时, SLCMLs 模型的动力学行为是: (a) α, ϵ 的取值范围受到了限制, ϵ 较小时就可以得到非常丰富的动力学图案; (b) 在 α, ϵ 同时较小时, 浸润线演化主要以随机态出现; (c) 在 α, ϵ 同时较大时, 仍能在局部出现稳定的周期态; (d) 模型时空行为可分为随机图样流、选择图样流、缺陷传播行为和完全发展湍流 4 种。

3) 浸润线演化受尾矿坝坡角影响比较明显。坡角越大越容易出现混沌状态。

4) 浸润线的各种时空行为和其渗流状态密切相关, 反映出了浸润线各种状态是其时空演化的结果, 从而揭示了浸润线的安全机理。浸润线耦合映象格子模型也可以用来解释其他各类边坡的复杂渗流现象。

References(参考文献):

- [1] Jiang Weidong(蒋卫东), Li Xibing(李夕兵) and Qiu Gengsheng(邱更生). The largest lyapunov exponent analysis of the seepage line of tailing dam of Yinshan lead-zinc mine[J]. *Metal Mine* (金属矿山), 2003, (4): 43 ~ 45
- [2] Jiang Weidong(蒋卫东), Li Xibing(李夕兵) and Qiu Gengsheng(邱更生). A new method for chaos controlling of seepage line in tailings dam based on analysis of largest lyapunov exponent[J]. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2003, 3(5): 16 ~ 20
- [3] Jiang Weidong(蒋卫东), Li Xibing(李夕兵), He Huaijian(贺怀建), et al. Study on chaos of the seepage line of tailings dam based on grey operator[J]. *Rock and Soil Mechanics* (岩土力学), 2004, 25(2): 242 ~ 245
- [4] Jiang Weidong(蒋卫东) and Li Xibing(李夕兵). Spatiotemporal chaos model of seepage line in tailings dam and its back analysis[J]. *Journal of Central South University of Technology* (Natural Edition) (中南工业大学学报(自然科学版)), 2003, 34(6): 704 ~ 707
- [5] Jiang Weidong(蒋卫东) and Li Xibing(李夕兵). Spatiotemporal chaos model of abnormal saturation line in tailings dam and its nonlinearity dynamical character[J]. *Journal of Central South University of Technology* (Natural Edition) (中南大学学报(自然科学版)), 2004, 35(2): 328 ~ 332
- [6] Liu Z C. Coupled map lattices(CMLs) models and the nonlinearity of turbulence[J]. *Applied Mathematics and Mechanics* (English Edition), 1998, 19(9): 881 ~ 887
- [7] Abramson G and Vega J L. Extremal coupled map lattices[J]. *The European Physical Journal B*, 1999, 9: 361 ~ 364

- [8] Lind P G, Corte-Real J and Gallas J A C. Modeling velocity in gradient flows with coupled-map lattices with advection[J]. *Physical Review E*, 2002, 66(1): 1 ~ 6
- [9] Platt N and Hammel S M. Pattern formation in driven coupled map lattices[J]. *Physica A*, 1997, 239(1-3): 296 ~ 303
- [10] He G W, Cao L Y and Li J C. Convective coupled map for simulating spatiotemporal chaos in flows[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 1995, 14(1): 1 ~ 7
- [11] Kaneko K. Pattern dynamics in spatiotemporal chaos, pattern selection, diffusion of defect and pattern competition intermittency[J]. *Physica D*, 1989, 34: 1 ~ 41
- [12] Kaneko K. Spatiotemporal chaos in one-and two-dimensional coupled map lattices[J]. *Physica D*, 1989, 37(1-3): 60 ~ 82

Spatiotemporal chaos of saturation line in tailings dam and its safety mechanism

ZHANG Chun-sheng, JIANG Wei-dong

(Jiangxi Copper Group Company, Guixi 335424, Jiangxi, China)

Abstract: Seeing the evolution of the saturation line can be displayed either in the dimension of time or of space as well as the slanting angle of the tailings dam, the present author has come up with a coupled map lattices model, $v_{n+1}(i) = (1 - \epsilon)f(v_n(i)) + \epsilon(1 + \sin\theta)f(v_n(i-1))$ to describe the above evolution. The author has also analyzed the given initial condition and boundary condition of such lines in description of the nonlinear dynamic nature of the new model. The results indicate that the complex spatiotemporal behaviors, which can be divided into four patterns: the flow of random patterns; the flow with selected patterns; the transmission of defects and the fully developed turbulent state, all of which can be said to exist in such evolution of the saturation line. On the condition that the values of nonlinearity parameter α and strength of coupling ϵ are in narrow range and the ϵ is lesser, such dynamics patterns are very much likely to happen. Therefore, the evolution of such saturation line can be influenced remarkably by the slanting angle that the higher value means the easier occurrence of chaotic state. Each spatiotemporal behavior reflecting the corresponding state of the saturation line will be consequently lead to its safety essence. Besides, SLCMLs can also be used to explain many other complex phenomenon in seepage.

Key words: safety engineering; tailings dam; coupled map lattices; spatiotemporal chaos; saturation line

CLC number: O415.56

Document code: A

Article ID: 1009-6094(2005)01-0108-05