

顾及沟谷结构特征的数字地形模拟生成方法

曹 阳 龙 毅 闾国年

(南京师范大学地理科学学院, 南京 210046) (地理信息科学江苏省重点实验室, 南京 210046)

(虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046)

摘 要 利用计算机模拟生成的数字地形,其真实感很大程度上来源于其包含的与真实地形相似的结构特征和空间关系。为了使模拟生成的随机地形具有流水地貌中水系与地形相互套合的空间形态关系,引入一种新的数字地形模拟生成方法。该方法利用受粘结系数和平均场参数控制的受限扩散凝聚(DLA)模型生成谷底线,并在此基础上利用逐级膨胀操作模拟生成数字地形。实验结果证明,使用该方法生成数字地形在过程上具有良好的可控性,在形态结构上具有随机性,且具有类似于自然环境中的树状沟谷结构特征。

关键词 沟谷结构 数字地形 DLA模型 扩展参数

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)05-990-07

A Digital Terrain Simulation Method Considering the Structural Characteristic of the Valleys

CAO Yang, LONG Yi, LÜ Guo-nian

(School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046)

(Key Laboratory of Geographic Information Science of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210046)

(MOE Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing 210046)

Abstract The structural features and spatial relations in a digital terrain are definitive manner in terrain simulation by computer. It determines whether a digital terrain is similar to the natural ones. In the natural environment rivers are embedded in mountains. To bring this spatial modality into a stochastic terrain built by computer, a new method is introduced in this paper. In the method, a valley line is generated from a revised DLA model (Diffusion Limited Aggregation) controlled by sticking coefficient and mean field parameter. After a simplification of the valley line, a continuous expanding operation is used to establish the digital terrain subsequently. The experiment result shows that this method is controllable in the process of establishing the terrain. And the terrain is stochastic with natural dendritic valley in it.

Keywords valley structure, digital terrain, DLA model, extended parameters

1 引言

随着计算机可视化技术的迅猛发展,数字地形在地理学、地图制图学、地理信息系统以及虚拟现

实、数码影视、电脑游戏等诸多领域得到越来越广泛的应用。虽然通过测绘方法构建的数字高程模型(DEM)具有较强的真实性和客观性,但采集过程需要投入大量的人力物力,而且也难以得到符合用户特定需求的理想地形形态。基于这样的原因,一些

基金项目:国家自然科学基金项目(40671154)

收稿日期:2008-05-16;改回日期:2009-01-09

第一作者简介:曹 阳(1984 ~),男。南京师范大学地图学与地理信息系统专业硕士研究生。主要研究方向为地理信息综合及分形几何学在地图学中的应用。E-mail:kalashnikov1947@sohu.com

通讯作者:龙 毅(1968 ~)。E-mail:longyi@nynu.edu.cn

可以随机生成,但又同时具有某种真实地形结构特征的数字地形模拟方法往往更加经济实用。

自然界中的地形是长年地球内应力和地表外营力共同作用的结果,其形态丰富多样。其中,水流侵蚀对地形的塑造作用是外营力作用中最主要,也是最明显的一种作用,经过漫长的时间,在原有地形上形成了树状的沟谷结构特征。

针对真实地形的复杂性,学者们提出了多种数字地形模拟生成方法。分形方法以简单的原理,通过不断迭代可以生成复杂的图形。其中构造分数布朗运动(FBM)表面的方法及其各种改进方法是当前用于数字地形模拟的常用方法^[1-2]。这类方法生成的地形不具有沟谷结构特征。Przemyslaw等学者将中点位移法和改进的Squig-Curve方法相结合,在三角形格网系统中构造出带有水系的地形^[3],但水系的边界往往会出现接近垂直的陡坡,与多数自然环境中的情况不符。文献[4]提出了将各种分形生长模型生成的线状图形作为“骨架线”再结合随机圆盘法生成地形的的方法,其不足在于地形坡面上没有水流侵蚀、汇聚形成的沟谷形态。综合分析这些方法,其共同之处在于均使用纯粹的随机过程进行地形模拟,缺乏对地形形态具有影响作用的必要参数控制。而在目前尚无法全面定量描述与模拟地形变化及其因子作用的情况下,适当加入人为的监控与干预将有助于保证模拟的效果。

为了顾及自然地形中广泛存在的沟谷结构特征,在参考文献[4]的基础上,本文提出了一种将随机方法和确定性方法相结合的数字地形模拟生成方法,即首先由扩展参数控制的受限扩散凝聚(DLA)模型生成地形的谷底线,然后在谷底线的基础上通过由预先定义的高程增量函数控制的逐级膨胀的方法模拟生成地形。

2 DLA模型及其扩展参数

2.1 DLA模型及其原理

DLA模型的演化方式十分简单。在正方形格网中心设置一个粒子作为凝结核,以凝结核为圆心,以一个较大(如1000)的半径画圆,即得到粒子扩散圆环。每次从圆环的任意一个位置向内扩散出一个粒子,在格网内做布朗运动。当粒子运动到凝结核或先前已凝结的粒子边界上即被吸附,成为凝聚体边界的一部分。若粒子运动到相对较远的位置则发

生逃逸。当一个粒子被吸附或逃逸后,新的粒子被释放到格网中继续随机运动。粒子扩散圆环的半径随着凝聚体的不断向外伸展而不断增加,以保证凝聚体和圆环之间始终有足够的空间供粒子自由运动。当凝聚体上的粒子数量达到事先设定的值或凝聚体出现显著形态特征时,即可人为终止模型的演化过程。DLA模型及其各种扩展模型主要用于模拟和分析理化实验中物质的凝聚生长现象^[5-6],近年来也运用于地理学的一些领域^[7]。

DLA模型的演化过程可以看作是扩散粒子在格网空间内的浓度分布,用 μ 表示。在无限远处 $\mu=1$,当格网空间相对于凝聚体足够大时 μ 可视为常数,且由于粒子到达边界即被吸附,边界上有 $\mu=0$ 。DLA模型可以用拉普拉斯方程控制,如下:

$$\nabla^2 \mu = \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mu}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

经过长时间的生长实验,DLA模型可以生成具有辐射状分叉结构的图形,如图1所示。

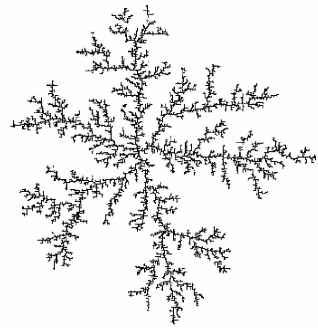


图1 DLA模型生成的图形

Fig. 1 Graphics generated by DLA model

2.2 DLA模型的扩展

大量实验表明,DLA模型的分形维数保持在1.65左右,且图形的粗细、疏密程度均无差别。为了描述自然界中形态万千,繁简各异的地形谷地,作者使用参考文献[8]中的方法,对原模型进行扩展。即对原DLA模型引入粘结系数(sticking coefficient) S 和平均场参数(mean field parameter) M 。

参数 S 通过粘结概率 $P_i = S^{3-n_i}$ 间接地影响模型,其中 i 是格网空间中的位置序号, $P_i \in (0, 1]$, n_i 是位置 i 的4个邻域中已被占用的位置数,显然 $n_i \in [1, 3]$ 。当 $S < 1.0$ 时粒子有 $1 - P_i$ 的概率脱离位置 i 重新开始随机行走并最终凝结于其他位置。由于图形的形态实际上是受因变量 P_i 的控制,所以也可

以使用其他具有相同值域且受一个自变量控制的概率计算公式;参数 M 表示任意位置需要被扩散粒子访问 M 次后才允许吸附粒子。 M 起到对系统噪声进行定量化抑制的作用。当 M 较大时粒子有更多的机会凝聚到离凝结核更远的位置上去。

参数 S 和 M 对模型的作用在图形上表现为 S 控制图形的粗细和疏松程度。 S 越小,图形的枝杈就越粗壮、疏松。而 M 控制图形趋向于十字形的程度。 M 越大图形的枝杈越平直,图形越趋近于十字形。图 2 为 $S=0.85, M=3$ 时生成的图形。此图形在本文中作为地形谷底线的准备数据。

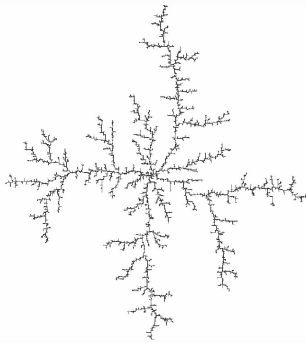


图 2 利用扩展的 DLA 模型生成的图形

Fig. 2 Graphics generated by the extended DLA

3 数字地形的生成

3.1 谷底线的构造原理

由于 DLA 模型可由拉普拉斯方程描述,所以可视其两个边界条件之间的广大格网空间内存在一个静电场。静电场和重力场均为保守场,具有保守力(静电力、重力)做功仅与位移有关的性质。而自然界中的水系正是由水受重力作用从高向低流动并逐渐汇聚而成的。在无噪声的情况下,其路径应沿着场的方向呈直线。如果将自然界中的地形起伏、地质构造等因素看作是在局部地区影响水流方向的“噪声”,则利用 DLA 模型及其扩展模型模拟自然界中流水沟谷的方法不单是追求形态上的相似,而且是具有其实际物理意义的。

3.2 地形谷底线的选取与处理

自然界中的水系通常是开放的系统。它具有相互独立的输入(河源)及输出(河口),在地表呈树状或线状分布,而 DLA 模型及本文中的扩展模型所生成的图形呈辐射状分布。由上文所述的物理意义及自然地理学常识可知,这样的图形描绘的是一种类

似火山口或内陆汇水盆地的地形。水流从外围的高处经过汇流注入中心的低洼处,形成内陆湖或火山湖。如果本文模拟的是只具有一条河流的小流域内的地形,则取其中任意一条枝杈均可满足需要。

通过交互的方式选取图 2 中图形的左枝,经放大观察可以发现,不管是在其末梢还是在较为主干的部分,其两侧均存在一些毛刺状的细小分支,如图 3 所示。这种现象在自然界中是不多见的。为了使生成的谷底线形态尽可能地符合自然规律,需要对原有图形进行化简,将这些小分支剔除。

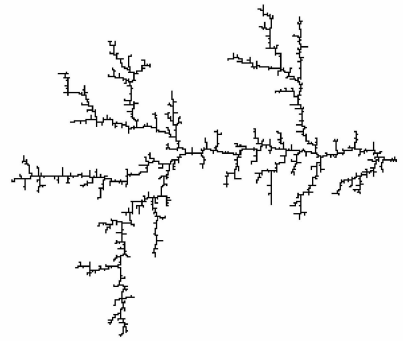


图 3 含有细小分支的图形

Fig. 3 Graphics with small branches

以尺度的观念来看,通常认为,大尺度上的信息体现事物的趋势和结构,而噪声和干扰信息通常出现在小尺度上,所以对图形中各分支的删除和保留的问题实际上就是对这两种尺度的界定问题,需要一个长度阈值 l_d 作为其量化指标,并且各弧段的去留判断可表示为

$$F(l_i) = \begin{cases} \text{true} & l_i \geq L \\ \text{false} & l_i < L \end{cases} \quad (2)$$

式中, l_i 表示图形中弧段 i 的长度, L 为长度阈值, $F(l_i)$ 为判断弧段 i 被保留还是删除的判断函数,其取值为 true 时表示弧段 i 被保留,取值为 false 时表示被删除。

考虑到矢量数据的易编辑特性,作者将格网内的图形转换为矢量形式,并对每一条弧段记录其长度。对这些弧段以长度为关键字,按从小到大的顺序排序,可以得到一个单调递增的弧段序列。为了使谷底线的繁简程度可以被灵活控制,作者在实验中没有采用自动化的长度阈值判定方法,而是以化简后的视觉效果为评判标准,通过交互的方式确定合适的弧段长度阈值 L ,从而只保留相对大尺度上的结构信息。图 4 为剔除细小分支后的图形,其宏观的结构特征得到了保留,而细小的分支已被删除。

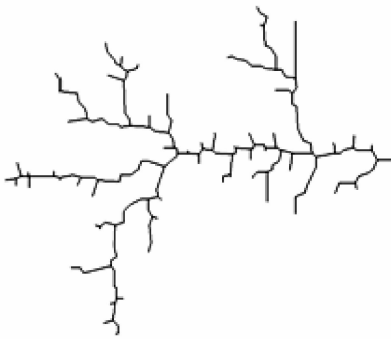


图 4 去掉细小分支后的图形

Fig. 4 Graphics after deleting the small branches

3.3 地形谷底线 3 维信息的建立

河流是 3 维空间内的地理实体。其侵蚀作用受到侵蚀基准面的控制, 而河水的流动受到河谷纵剖面坡度的影响。侵蚀基准面高程是整个流域内的最低高程, 由于河谷的纵剖面形态存在一定坡度, 所以河水总是沿着倾斜的河谷流动, 直至其侵蚀基准面。缺少了这两个控制因素, 生成的地形谷底将失去流水地貌的特征。因此, 需要通过这两个因素建立谷底线的 3 维信息。

通过人为地设置一个较小的数(如 0.087)作为这个流域谷底的坡度, 并将各弧段结点在侵蚀基准面上的投影到“河口”点的距离与这个坡度相乘, 可以得到各弧段结点的高程。

如图 5 所示, 点 A 代表“河口”点, 面 ABC 为侵蚀基准面, 线段 AE 和 DE 分别代表主干谷底线和一条分支谷底线, 箭头表示水流的汇聚方向。由于 DLA 模型生成的枝杈对外围发射的活动粒子具有“屏蔽”作用, 图形的绝大多数枝杈的都向着远离河口的方向伸展, 而伸展方向较偏或为逆向的枝杈由于接触活动粒子的概率很小, 其长度均达不到给定的长度阈值 L , 在谷底线的化简过程中被剔除。因此, 在化简后的图形中, 总是有 $\angle ABC \geq 90^\circ$ 。又因为 $\angle BAE = \angle CAD$ 且 $\tan \angle BAE = 0.087$, 所以边 $CD > BE$ 。通过这种方法可以保证谷底线的每条弧段起点高程总是大于终点高程。此外, 为了使谷底线成为地形的一部分, 还需对当前的矢量数据进行栅格化处理, 以得到栅格谷底线, 其中被矢量线穿越的栅格高程由线形内插产生。从而构造了具有 3 维信息的地形谷底线, 且这种结构能够近似地符合真实地形的一般形态、结构规律。

3.4 数字地形的模拟生成

在获得 3 维谷底线之后, 区域内除谷底线之外

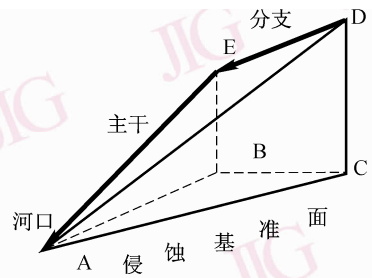


图 5 谷底线高程变化示意图

Fig. 5 Elevation change of valley lines

的大部分栅格依然处于空白状态。可以在已有栅格形式谷底线的基础上, 采用逐级膨胀并同时赋高程值的操作, 对空白区域填充, 在格网空间内构建地形。每膨胀一次, 图形就在 4 邻域上“加粗”一层。对于新生成的栅格点位, 其高程点位被赋予周围 4 邻域内的高程最低值与高程增量 Δh 的和。

模拟生成数字地形的具体算法流程如下:

(1) 将先前栅格地形谷底线上各位置的状态设为 FINISHED, 简称为 F(如图 6(a)所示);

	F				F
	F				F F
	F F				F
		F		F F	
		F F F F			
		F			
	F				
F					

(a)

R	F	R			R	F
R	F	R			R	F F
R	F F	R			R	F R
	R	F R R		F F	R	
	R	F F F F		F	R	
	R	F R R R		R		
	R	F R				
F	R					

(b)

F	F	F			F	F
F	F	F			F	F F
F	F	F F			F	F F
	F	F F F F F			F	
	F	F F F F F			F	
	F	F F F F F			F	
	F	F F F F F			F	
F	F	F				
F	F					

(c)

F	F	F	F	F	F	F	F
F	F	F	F	F	F	F	F
F	F	F	F	F	F	F	F
F	F	F	F	F	F	F	F
F	F	F	F	F	F	F	F
F	F	F	F	F	F	F	F
F	F	F	F	F	F	F	F
F	F	F	F	F	F	F	F
F	F	F	F	F	F	F	F

(d)

图 6 逐级膨胀操作示意图

Fig. 6 Sketch of successive expanding

注: 图 6 中的黑体字母表示当前栅格正在被操作。

(2) 判断格网空间中一个状态不为 FINISHED 的栅格其 4 个邻域位置上是否具有状态为 FINISHED 的栅格, 如果有则求出这些栅格的高程最小值 H_{min} ;

(3) 给定一个高程增量 Δh , 将当前栅格的高程赋为 $H_{min} + \Delta h$, 并将栅格状态设为 READY, 简称为

R(如图 6-b);

(4)对整个格网空间中的栅格重复步骤(2)、(3);

(5)将整个格网空间中状态为 READY 的栅格的状态修改为 FINISHED(如图 6-c);

(6)重复步骤(2)~(5),直到所有的栅格的状态均为 FINISHED(如图 6(d)所示)。

4 实验结果与分析

本文实验在 CPU 为 PentiumM 1.86 GHz,内存为 512 M 的 Windows XP 系统上,使用 VC++ 2005 编程实现了上述算法,并用数学软件 Matlab 绘制结果图。表 1 为使用不同类型的高程增量函数 Δh 生成地形的效果对比图,其中高程增量函数参数 x 表

示膨胀操作的次数。

从以上阐述的方法和实验结果中可以看出,数字地形的形态受到 3 个因素——谷底线、流域坡度和高程增量 Δh 的共同影响。谷底线影响地形的总体起伏特征,流域坡度影响地形的整体倾斜幅度,高程增量影响山体的高程和坡度变化特性。

谷底线的影响作用主要表现在对区域地形起伏的控制上。由上文阐述的地形形态的生成方法可知,图面区域内栅格高程的赋值是具有先后顺序的。距离谷底线越远的栅格越晚被标记并赋予高程值,所以其高程累加量就越大。当流域坡度较小时,可以认为区域内越远离谷底线的位置上的高程值越大。通过对表 1 的观察可以发现,地形的随机性直接来自于谷底线的随机性,而除谷底线形态以外的两个参数对地形的总体起伏特征没有影响。

表 1 不同类型高程增量函数生成地形效果对比表

Tab. 1 Compare between terrains generated from different elevation increment functions

高程增量函数类型	高程增量函数 Δh	高程增量函数形态图	数字地形效果图	地形等高线图
均匀型	$\Delta h = 0.1$			
递减型	当 $x < 300$ 时 $\Delta h = -0.01x + 3$ 当 $x \geq 300$ 时 $\Delta h = 0$			
先扬后抑型	当 $x \leq 150$ 时 $\Delta h = 0.03x$ 当 $x > 150$ 时 $\Delta h = -0.01x + 6$			

流域坡度对地形的影响作用表现在两个方面:

(1)通过设定流域坡度可以使生成的谷底线更符合地理学的普遍规律。

(2)间接影响生成地形的高度。

区域内非谷底线的任意位置上的高程均可由下式表示:

$$E_i = e_i + \Delta H_i \quad (3)$$

式中, E_i 为位置 i 上的高程值, e_i 为由高程为 e_i 的谷底线栅格通过膨胀操作逐步传播至位置 i 的高程基值, ΔH 为位置 i 上的累积高程增量, 它是膨胀次数的单调递增函数。由于谷底线的结点高程是流域坡度与结点在侵蚀基准面上的投影到“河口”点距离的乘积, 而 e_i 的值是由谷底线结点经线性内插产生的, 所以, 流域坡度间接地影响了区域内地形的高度。在表 1 所示的 3 组地形的同一位置均存在一条陡坎, 且陡坎位于区域高程最大处。这正是由于陡坎两侧的栅格虽相距很近但其高程基值分别来自谷底线上相距较远的位置, 高程基值的差距较大所造成的。

与前两个因素相比较, 高程增量 Δh 对地形形态的影响是最显著的。3.4 节中的地形模拟生成过程可以表示为

$$h(d) = \begin{cases} h(d-1) + \Delta h(d) & d > 0 \\ H & d = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $h(d)$ 为当前栅格位置上的高程, $\Delta h(d)$ 为当前栅格位置上的高程增量函数值, d 为当前栅格位置到谷底线的最近距离, 显然 $d \geq 0$, H 为距当前栅格位置最近的谷底线栅格的高程, 当 $d = 0$ 时, 当前栅格即处于谷底线上, 所以有 $h(0) = H$ 。由此可以看出, 一方面, 高程增量 Δh 的大小决定了地形的高度, 另一个方面由于它是膨胀次数的函数, 所以它的变化方式决定了地形坡度的变化方式。

当高程增量函数为常函数, 如 $\Delta h(d) = K$, K 为常数时, 地形的坡度是一个定值。从谷底线的横剖面角度观察, 区域中的谷地为“V”字形。其等高线特征表现为相邻等高线之间近似于平行状态, 且等高线间距趋于一致;

当 Δh 为单调递减函数, 如 $\Delta h(d) = K - a \times d$, $a > 0$ 时, 地形的坡度随高程的增加逐渐减小, 在横剖面上, 因谷地呈现倒置的“人”字形, 所以等高线的间隔随高程的增加逐渐变宽;

而当 Δh 为分段函数, 如

$$\Delta h(d) = \begin{cases} a \times d & d \leq D \\ K - b \times d & d > D \end{cases}$$

K 、 a 和 b 为大于零的常数, D 为函数间断点时, 地形的坡度随高程的增加呈现由小到大再到小的规律。通过对沟谷横剖面的观察发现, 其谷地为倒置的钟形, 等高线间距在山顶和谷地处较宽, 在山坡处较窄。使用这种高程增量变化方式构造的地形具有宽阔的河流谷地、陡峭的山坡和平缓圆润的山脊。

因此, 通过改变高程增量函数的形式, 可以模拟生成具有各种丰富坡面形态的数字地形。

5 结 论

考虑沟谷结构的数字地形模拟是可以探讨水系与地形之间的空间形态关系, 并进而分析地貌发育变化过程与特征的研究途径之一。它同时涉及到现代数学、计算机图形学和地理信息科学等相关技术、学科的众多知识。应用分形几何方法, 模拟随机地貌形态在分形图形学和分形艺术领域已得到了较为充分的研究, 但是从地理视角出发强调地理要素之间的相互联系, 是值得进一步探讨的内容。

本文顾及到自然界中流水地貌的空间形态和结构特征, 分析和阐述了一种基于粘结系数和平均场参数的扩展 DLA 模型生成谷底线, 并在此基础上通过逐级膨胀算法模拟构建数字地形的的方法。实验结果表明, 采用这一方法可以在构建地形的同时顾及沟谷结构特征, 在一定程度上更接近于自然界中地形的一般规律。

但是本文所探讨的这一方法依然存在一些不足之处, 如在山脊处存在陡坎、地形坡向变化剧烈等等, 作者将在其后的研究中针对这些问题作进一步的更深入的研究。

参考文献 (References)

- 1 She Long-hua, Shen Lin-ching, Chang Wen-sen. FBM-Based fractal simulation of terrain[J]. Journal of Astronautics, 1999, 20(3): 21-25. [余龙华, 沈林成, 常文森. 基于 FBM 的分形地形模拟原理研究[J]. 宇航学报, 1999, 20(3): 21-25.]
- 2 Tan Jian-Rong, Chen Hong-Liang. A controllable fractal generation method based on FBM constraint Model[J]. Journal of Software, 2003, 14(3): 651-659. [谭建荣, 陈洪亮. 基于 FBM 约束模型的可控性分形生成方法[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 651-659.]
- 3 Przemyslaw Prusinkiewicz, Mark Hammel. A fractal model of mountains with rivers[A]. In: Proceedings of Graphics Interface

- [C], Toronto, Canada, 1993: 174-180.
- 4 Jin Gang, Li De-hua, Li Ze-yu. A terrain simulation based on the structure characteristic[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1998, **26**(9): 36-38. [金刚, 李德华, 李泽宇. 一种基于结构特征的地形模拟产生方法[J]. 华中理工大学学报, 1998, **26**(9): 36-38.]
 - 5 Yu Zhen-xun, Tan kai-xuan, Yi Zheng-ji. Advance in simulation of flocs growth and their fractal properties[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2007, **21**(2): 46-49. [余振勋, 谭凯旋, 易正戟. 絮体生长模拟及其分形特性的研究进展[J]. 华南大学学报(自然科学版), 2007, **21**(2): 46-49.]
 - 6 Gao Guo-liang, Qian Chang-ji, Zhong Rui. Monte Carlo simulation of cluster growth on an inhomogeneous substrate [J]. Acta Physica Sinica, 2006, **55**(9): 4460-4465. [高国良, 钱昌吉, 中瑞. 非均质基底表面上团簇生长的 Monte Carlo 模拟[J]. 物理学报, 2006, **55**(9): 4460-4465.]
 - 7 Kuang Yi, Chen Yan-guang. DBM & DLA model and fractal simulation of urban growth: A theoretical studies of methods of simulating fractal form of cities [J]. Journal of Xinyang Teachers College (Natural Science Edition), 2001, **14**(3): 303-308. [况颐, 陈彦光. DLA 和 DBM 模型与城市生长的分形模拟——关于城市分形形态模拟方法的一个理论探讨[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2001, **14**(3): 303-308.]
 - 8 Chiu K C, Lee F S, Tu S J. A study in monte carlo simulation of modified DLA [J]. Chinese Journal of Physics, 1992, **30**(1): 143-155.