

# 鱼糜团聚结构的随机分形模拟初探<sup>3</sup>

赵杰文 柴春祥 邱白晶

(江苏理工大学)

**摘 要:** 鱼糜团聚结构影响其流变特性。用计算机模拟鱼糜团聚结构可以直观地揭示鱼糜团聚结构对其流变特性的影响。用随机分形初步模拟静态鱼糜团聚结构, 得出了可模拟静态鱼糜团聚结构的修正 DLA 模型。

**关键词:** 鱼糜; 团聚结构; 分形; 模拟

鱼糜中团聚体的大小、分布、表面不规则性影响其流变特性<sup>[1]</sup>。由于客观条件的限制, 不易获得流动鱼糜团聚体的结构。用计算机模拟鱼糜团聚体的随机运动, 既可以克服实验条件的不足, 又可以直观地揭示鱼糜团聚结构对其流变特性的影响。因此本文初步尝试用随机分形来模拟静态鱼糜的团聚结构, 为其动态模拟打下基础。

## 1 分形研究中的随机模拟

分形生长、分形结构与性能及分形动力学是分形研究的三大问题<sup>[2]</sup>。分形生长研究的目的在于给出分形生长的物理过程, 以便揭示分形结构从成核到长大过程的物理规律。分形生长的现象大量存在于物理学、化学、生物学、材料科学及医学等领域中, 而对该现象的研究还处于探索阶段。

80 年代, 随着人们对分形认识的深入, 分形形态在自然界的许多无序现象中存在的问题日益增多, 促使人们开始对分形形态的形成过程进行探讨。对复杂的分形结构, 用传统的科学手段加以描述是很困难的。人们无法用周期、密度、体积等时间、空间概念予以定量的描述, 也无法用定量的函数对其进行解释。即使得到了描述分形形成过程的动力学方程, 也因为此类方程多数属于非线性方程而难于进行纯解析法的研究。目前科研中常用的较好的方法是模拟其形成的过程。为此人们提出了各种生长模型, 用解析法、实验法和计算机模拟相结合进行研究。如果理论模型、实验结果、计算机模拟结果一致, 就可以认为基本上弄清楚了该图形的生成机制。

人们已对欧氏平面纹理、磁性超微粒斑图的形成、粒子间的聚集、蛋白质和酶的表面及链结构、自然风景、气体溶胶凝聚等用分形进行模拟<sup>[2~5,7]</sup>。但从研究成果看, 绝大多数的计算机模拟结果与实验结果并不完全符合, 因此在这研究领域中的物理模型、数学模型与计算技术上都存在着许多有待深入进行探讨的问题。

计算机分形模拟的模型基本上可分为 3 类<sup>[3]</sup>: 1) 有限扩散凝聚模型, 简称 DLA 模型; 2) 弹

收稿日期: 199906230

3 国家自然科学基金资助项目(19872030)

赵杰文, 教授, 镇江市 江苏理工大学生物与环境学院 750#, 212013

射凝聚模型, 简称 BA 模型; 3) 反应控制凝聚模型, 简称 RLA 模型。

DLA 模型能有效地用计算机模拟自然界和实验中许多随机生长图形的分形形态, 而且还可以解释一大类分形的形成过程, 显示了分形与随机生长之间的关系, 因此该模型深受人们的重视。按照此模型, 通过简单的运动学和动力学方程就可以产生出具有标度不变性的自相似的分形结构, 从而建立起分形理论和实验观察之间的桥梁, 在一定程度上揭示出实际体系中分形生长的机理。DLA 模型已成功地用于模拟胶体悬浮系统, 枝晶生长以及聚合物的聚合过程, 地形地貌, 粘性指延, 金属颗粒聚集等现象<sup>[3, 6, 8]</sup>。

### 2 DLA 模型原理简介

无规扩散是自然界中广泛存在的一类现象, 可以用 Fick 定律来加以描述<sup>[2]</sup>

$$J = - C \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = C \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}$$

式中  $J$  —— 扩散流量;  $\rho$  —— 粒子浓度;  $C$  —— 扩散系数;  $t$  —— 时间。

在 DLA 模型中,  $\rho$  表示点阵出现粒子的几率。如果没有聚集中心, 则  $\rho$  是均匀的。有聚集中心, 从远离中心到中心附近存在概率梯度场。如果认为点阵足够大, 而中心粒子簇足够小, 可以认为概率不随时间变化, 则此扩散是一种稳态扩散过程。此时, Fick 扩散定律变为

$$J = 0 \text{ 或 } \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$$

根据 DLA 模型中  $\rho$  表示方格点阵中粒子出现的概率, 将边界条件取作粒子或粒子簇的周界上  $\rho = 0$ , 而在远处  $\rho = 1$ 。由此可以给出 DLA 的数学模型

$$\begin{cases} \rho = 0 \\ \rho_{\text{边界}} = 0 \\ \rho_{\text{远处}} = 1 \end{cases}$$

在实际操作时, 用 DLA 模型模拟复杂图形的主要步骤如下:

- 1) 先产生一个 100 × 100 的方格网格平面。
- 2) 在网格中央放置一个种粒子作为凝聚的核心。
- 3) 在网格上某个随机位置产生一个随机运动的粒子, 从该位置开始作随机运动, 在上下左右 4 个方向上随机地选择一个方向并移动一个网格单位。
- 4) 如果该运动粒子运动到和种粒子相邻的格点上, 则停止运动并成为凝聚体的一部分。
- 5) 重复进行步骤 3) 和 4), 直到粒子数达到预先设定的数值。

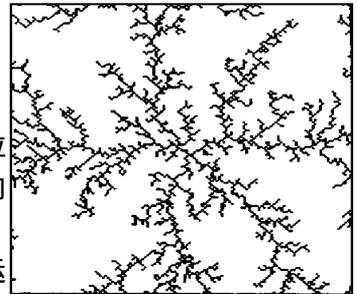


图 1 DLA 模型生成的图形

Fig 1 Graph generated from DLA model

由上述步骤可知, 用 DLA 模型是以种粒子为中心, 又以粒子为基本组成元素进行图形模拟的。图 1 是用 DLA 模型生成的, 从图中可以看出, DLA 模型生成的图形具有向周围伸展的大大小小的分枝, 除了粒子大小和图形大小之外, 不存在其它特征长度。

### 3 鱼糜团聚结构特征的分析

把从市场购得的每条重约为 1 kg 淡水活鲢鱼进行刮鳞, 清除内脏, 去头, 去尾, 去皮, 剔刺, 获得所需鱼肉, 然后把所得的鱼肉切成小块, 用食物搅拌器(顺德市桂洲镇长盈塑料电器

厂)加工成粘稠状的鱼糜。把鱼糜制成加工时间为 60 s, 鱼糜与添加水的质量比为 1 的鱼糜样品。放入冰箱中冷藏备用。

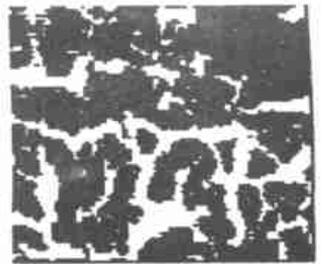
鱼糜是一种不定形的糊状物, 直接获取其团聚结构是很困难的。因鱼糜中的主要成分是水分子和蛋白质<sup>[2]</sup>。而蛋白质是维持其团聚结构的主要支撑成分, 故可认为蛋白质聚集体所形成的结构就是鱼糜的团聚结构。由于蛋白质可进行染色, 所以通过对鱼糜进行制片就可获得鱼糜试样。制片操作过程如下:

[样品] [固定] [脱水] [包埋] [切片] [染色] [试样]

对鱼糜团聚结构进行分析可知, 鱼糜微结构可用 5 个参数描述, 分别为孔隙平均径、孔隙直径的累积分布系数、距离维数、表面维数以及填充维数。孔隙平均径描述了鱼糜中孔隙尺寸的大小, 孔隙直径的累积分布系数反映了鱼糜中孔隙尺寸大小的分布, 距离维数反映了孔隙在鱼糜团聚体中的分布状态, 表面维数描述了鱼糜的表面状况, 填充维数反映了鱼糜填充其空间的程度<sup>[1]</sup>。

图 2 为加工时间为 60 s 时鲢鱼糜团聚结构特征图(鱼糜与添加水的质量之比为 1)。描述其结构的几何特征参数孔隙平均径、孔隙直径的累积分布系数、距离维数、表面维数以及填充维数的值分别为 41202 像素、- 01799, 1137, 11422 和 11841。

从图中可观察到, 鱼糜中存在大小不一的孔隙, 且孔隙并不是以一个点为中心向四周延伸形成的, 而是围绕着不同的中心形成的。事实上, 鱼糜团聚结构中孔隙的生成也绝不是以粒子为基本生成元素, 而是以大小不同的孔隙为生成要素。只要能对鱼糜中的孔隙进行模拟, 其团聚结构也就随之而成。鱼糜团聚结构中孔隙的分布与 DLA 模型生成的图形相似, 只不过有交叉现象, 正说明孔隙是以不同的中心而延伸的。



黑色—固形物 白色—孔隙

图 2 鱼糜团聚结构特征图

Fig 2 Image of agglomerated structure of minced fish

#### 4 鱼糜团聚结构的随机模拟及结果分析

从以上分析可知, 鱼糜团聚结构与现行的 DLA 模型生成的结构既有联系, 又并不完全相同, 两者的主要区别在于鱼糜团聚结构有多个中心, 因此必须对现行的 DLA 模型生成规则进行适当修正, 以使其反映鱼糜团聚结构图像的特点。修正后的 DLA 模型生成规则用于模拟鱼糜团聚结构的具体步骤如下: 1) 先产生一个  $100 \times 100$  的方格网格平面。2) 在网格中随机地放置若干个种孔隙作为孔隙团聚的核心。种孔隙的大小为鱼糜的孔隙平均径 41202 像素。3) 在网络上某个随机位置产生一个随机运动的孔隙, 从该位置开始作随机运动, 在上下左右 4 个方向上随机地选择一个方向并移动一个网格单位。每次所产生孔隙的大小依据孔隙累积分布系数在孔隙平均径左右波动。4) 如果该运动孔隙移动到和种孔隙相邻的格点上, 则停止运动并成为大孔隙的一部分。5) 重复进行步骤 3) 和 4), 检验填充维数的值, 直到填充维数的相对误差小于 1%。图 3 为通过此模拟步骤生成具有代表性的 9 幅图像。对 25 幅模拟图像进行分析计算得表 1。

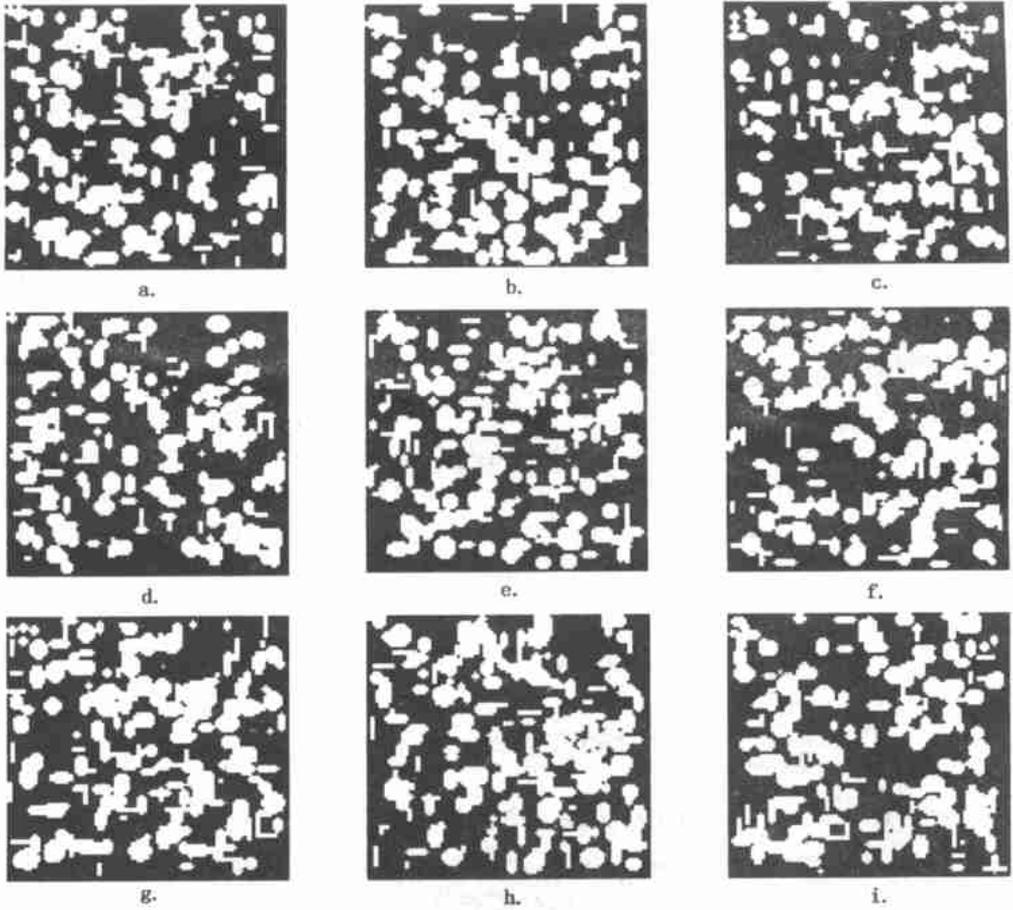


图 3 鱼糜团聚结构的模拟图像

Fig 3 Simulation image of agglomerated structure

表 1 鱼糜模拟图像的团聚结构参数

Tab 1 Agglomerated structure parameters of simulative image of minced fish

	孔隙平均 径 $\delta$ 像素	孔隙累积 分布系数	距离 维数	表面 维数	填充 维数
1	61987	- 11167	11363	11419	11835
2	71298	- 21158	11354	11401	11822
3	61001	- 11198	11366	11429	11838
4	51241	- 01925	11374	11423	11834
5	81267	- 01857	11358	11411	11842
6	51111	- 11166	11369	11412	11855
7	91121	- 11178	11366	11423	11819
8	61454	- 11188	11363	11428	11838
9	51786	- 01788	11358	11418	11836
10	91264	- 21376	11362	11422	11819
11	51478	- 01798	11377	11415	11844

续表

	孔隙平均 径 $\delta$ 像素	孔隙累积 分布系数	距离 维数	表面 维数	填充 维数
12	61232	- 01824	11355	11416	11836
13	81121	- 01937	11362	11418	11832
14	71256	- 11182	11356	11423	11821
15	61278	- 11877	11360	11421	11847
16	61628	- 11269	11368	11419	11838
17	81232	- 11324	11367	11418	11842
18	51445	- 01756	11363	11416	11829
19	61732	- 01889	11362	11420	11828
20	61217	- 11128	11368	11419	11836
21	71121	- 11123	11359	11417	11835
22	61254	- 11148	11364	11433	11837
23	51218	- 01995	11365	11421	11828
24	71568	- 11129	11362	11408	11839
25	81121	- 11132	11363	11411	11836
平均值	61817	- 11181	11363	11418	11835
标准方差	11203	01401	01005	01007	01009

从表 1 的结果来看, 25 次模拟中, 孔隙平均径和孔隙累积分布系数相差较大, 其平均值分别为 61817、- 11181, 标准方差分别为 11203、01401; 距离维数、表面维数及填充维数相差较小, 其平均值分别为 11363、11418、11835, 标准方差分别为 01005、01007、01009。

对模拟结果和实验结果<sup>[8]</sup>进行进一步比较, 表 2 为鱼糜真实图像与模拟图像团聚结构参数的对照表。

表 2 鱼糜真实图像与模拟图像的团聚结构参数

Fig 2 Agglomerated structure parameters of simulative image and initial image of minced fish

	孔隙平均 径 $\delta$ 像素	孔隙累积 分布系数	距离 维数	表面 维数	填充 维数
真实图像	41202	- 01799	11370	11422	11841
模拟图像	61817	- 11181	11363	11418	11835

从表 2 可以看出, 孔隙平均径和孔隙累积分布系数相差较大, 相对误差分别达到 62123%、4718%; 而距离维数、表面维数以及填充维数相差较小, 相对误差分别为 015%、013%、013%。可能原因: 鱼糜团聚结构是用随机分形进行模拟的, 尽管其有一套生成的规则, 但在操作过程中引入了随机性, 因而使得最终图形的具体形貌具有随机性。不同时间的两次操作产生的图形, 可以具有相同的分数维, 而形状可能不同<sup>[9]</sup>。模拟的结果正说明了这一点。距离维数、表面维数以及填充维数的值相差较小; 孔隙平均径和孔隙累积分布系数与鱼糜团聚结构的分布有关, 并且由于团聚结构生成的随机性, 因此孔隙平均径和孔隙累积分布系数的值相差较大。

以上结果表明, 尽管用DLA 模型模拟鱼糜团聚结构尚不完善, 但还是可以用来模拟鱼糜的团聚结构, 揭示鱼糜团聚结构的形成过程, 为鱼糜团聚结构的动态模拟初步奠定了基础。

## 5 结束语

本文用扩散有限凝聚模型- DLA 模型初步尝试模拟了鱼糜的团聚结构, 得出用DLA 模型适合模拟鱼糜团聚结构的形成过程, 由于其为静态模拟, 且还存在不足, 有待继续深入探讨。

### [参 考 文 献]

- [1] 柴春祥 糜状食品物料流变特性与微结构相关性的研究 [博士学位论文] 镇江: 江苏理工大学, 1999
- [2] 董连科 分形理论及其应用 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1991
- [3] 张济忠 分形 北京: 清华大学出版社, 1995
- [4] 李后强, 赵华明 蛋白质的分形 科学, 1995, 42(2): 100
- [5] 董 远, 胡光瑞 分形理论及其应用 数据采集与处理, 1997, 12(3): 187
- [6] 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 华中理工大学学报, 1998, 26(9): 36
- [7] 辛厚文 分形理论及其应用 合肥: 中国科技大学出版社, 1993
- [8] 江体乾, 侯望奇 多孔介质中的粘性指进与分形学 力学进展, 1994, 24(4): 476
- [9] 王东生, 曹 磊 混沌、分形及其应用 合肥: 中国科技大学出版社, 1995

## Random Fractal Simulation on Agglomerated Structure of Minced Fish

Zhao Jiewen Chaichunxiang Qiu Baijin

(Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212013)

**Abstract:** The agglomerated structure of minced fish was relative to its rheological properties. The influence of agglomerated structure of minced fish on its rheological properties could be displayed directly through simulating the agglomerated structure by computer. In this paper, random fractal was used to simulate static agglomerated structure of minced fish. The results showed that rectified DLA model was suitable.

**Key words:** minced fish; agglomerated structure; fractal; simulation