

# 大豆酸奶的微结构以及分形特征

李 锋, 华欲飞\*

(江南大学食品学院, 江苏 无锡 214036)

**摘 要:** 利用扫描电子显微镜的图像和 MATLAB 的编程, 通过显微照片及数值图像的灰度值分布并计算图像的灰度水平变化方差, 最终发现了大豆酸奶和酸牛奶两种产品的均匀或一致性程度存在着差异。并应用计盒维数法的基本原理考察了大豆酸奶和酸牛奶是否具有以自相似性为特征的分形结构, 最终确定豆浆酸奶和酸牛奶的分形维数分别为 1.9105、1.9268。通过对扫描电子显微镜得到的图像进行数字化处理以及 MATLAB 软件的应用, 在食品微观结构的研究中引入分形这个概念, 为食品的研究和加工领域解决和解释这一类问题提供新的思路和方法。

**关键词:** 大豆; 大豆蛋白; 大豆酸奶; MATLAB; 分形

## Microstructure of Soy Based Yoghurt and Fractal Characteristic

LI Feng, HUA Yu-fei\*

(School of Food Science, Yantze University, Wuxi 214036, China)

**Abstract:** Grey level distribution and variance analysis of the digitalized image of scanning electron microscope (SEM) micrographs based on the MATLAB programming were carried out, which showed that the consistency for soy based and dairy yoghurt was different. Box counting method was applied to investigate the fractal structure and the fractal dimension for soy based and dairy yoghurt was determined to be 1.9105 and 1.9268 respectively. Image analysis was carried out for the digitalized SEM using MATLAB software to study the microstructure of food and the concept of fractal was introduced to provide a new and effective method to resolve and explain problems in the field of yoghurt studies.

**Key words:** Soybean; soy protein; soy based yoghurt; MATLAB; fractal

中图分类号 Q51

文献标识码 A

文章编号 1002-6630(2005)07-0110-05

大豆酸奶是利用微生物的发酵作用制成的一种酸奶制品, 它既能发挥大豆的营养功效, 又能破坏大豆中的抗营养因子, 使大豆蛋白质的消化率得到明显提高。大豆酸奶与普通酸牛奶不同之处除了使用新鲜牛奶(或奶粉)、白砂糖为原料外, 并以大豆作为主要原料, 经乳酸菌发酵而成为活性乳酸菌保健饮品。大豆酸奶和酸牛奶在微观结构上既有相同之处也存在着差异性, 因此, 如何更深入的探讨他们之间的异同是开发研究这一类产品的关键之一<sup>[1,2]</sup>。

目前, 国内外对酸奶类制品的扫描电子显微镜的研究仅局限于语言和视觉的判断, 因此, 利用影像分析技术, 从微观结构上分析酸奶类制品对产品质构的影响也是势在必行的。可以说正是影像技术的利用使人类感官系统的功能获得了不可估量的延伸和放大。在 80 年代

中期, 影像分析的应用范围扩展到了生化研究领域, 那时候的研究主要集中于用影像分析来测量生物细胞大小与形态<sup>[3]</sup>。迄今为止, 国内外对影像分析的方法手段逐渐重视起来。然而, 影像分析应用于食品研究与制造加工领域还不够完善, 食品行业普遍使用电子显微镜技术对产品的微结构进行研究, 但仅局限于语言和视觉的判断。

本文使用 SEM 对豆浆酸奶以及酸牛奶的微观结构进行分析探讨, 通过 MATLAB 软件及编程, 试图通过显微照片及数值图像的灰度值分布, 考察大豆酸奶和酸牛奶是否具有分形特征——自相似性。使用计盒维数法, 最终确定了豆浆酸奶和酸牛奶的分形维数。使扫描电镜图片可以使用分维这个概念来表达, 并且通过豆浆酸奶和酸牛奶的比较, 对于进一步分析酸奶类产品的

凝胶性质作了创新性探讨。

## 1 材料与方法

### 1.1 大豆酸奶工艺流程

新煮沸冷却到80℃的蒸馏水→豆浆/奶粉(8/2)固形物含量7%→添加7%蔗糖+1%乳糖→均质(70℃/40MPa)→灌装→杀菌(115℃/15min)→冷却至42~45℃→接种(4%接种量, 杆菌:球菌=1:1)→发酵培养(42℃/6h)→冷却至10~12℃→4~7℃冰箱中冷藏<sup>[4,5]</sup>

### 1.2 SEM 样品制备方法

挑取适量样品, 先在5%戊二醛中固定1h, 用磷酸缓冲液洗三次。分别以50%、70%、90%、100%的乙醇溶液洗涤, 然后用戊二醛:乙醇为2:1的溶液洗涤。样品经过液态CO<sub>2</sub>处理后进行抽真空干燥, 干燥之后进行喷金, 然后将样品置于扫描电镜下观察<sup>[6]</sup>。

### 1.3 灰度直方图影像分析方法

使用扫描电镜的图像, 进行影像分析, 利用图像工具把图像剪切成一定大小的正方形, 并除去字幕。使用MATLAB 软件分析大豆酸奶和酸牛奶影像的灰度直方图。鉴于取样点及拍照点的选择以及灰度的实际分布和个人主观因素等而有较大差异, 因此, 考察了图像的三个不同区域的灰度直方图。

### 1.4 分形特征影像分析方法

利用图像工具把图像改为1000×1000像素大小的正方形, 并将其转化为一副24位真彩色图像。

### 1.5 分形维数的定义

分形维数的定义来自 Hausdorff 维数的定义。设X是n维空间中的一个集合, 以边长为ε的n维体积元去覆盖这个集合。设含有该集合元素的体积元的数目为N(ε), 则

$$N(\varepsilon) = (1/\varepsilon)^D \quad (1)$$

将(1)式两端取对数并令ε→0, 则有

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)}$$

D称为集合的 Hausdorff 维数。D为分数的集合称为分形集合<sup>[7,8]</sup>。

### 1.6 计盒维数法的基本原理

用尺度为ε的盒子去覆盖分形集, 并统计盒子数N, 然后将尺度ε和盒子N(ε)数点绘在对数坐标上或将log<sub>10</sub>(N)点绘在普通坐标上, 最后对标度区间内的点, 利用线性回归方法, 即可得到直线的斜率即对应于图像的分维数D<sup>[9]</sup>。

### 1.7 计盒维数法的编程机理

利用图像工具把图像改为1000×1000像素大小的正方形, 并将其转化为一副24位真彩色图像。然后分别以1、10、100、1000像素为单位切割整个图像, 计算每一个格子的每一个像素点的值, 大于灰度值90的计为1, 然后统计这个格子中大于90的也就是计为1的像素点的个数, 如果这个格子中大于灰度值90的像素点个数占整个格子像素点总个数的50%以上, 计这个小格子为1。在分析下一个以1个像素点为大小的格子, ……那么最后统计的是大于90灰度值的像素点个数占整个格子像素点总个数的50%以上的小格子的总数目。再依次分析10、100、1000个像素点为大小的格子数目。

### 1.8 灰度水平变化方差定义

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{式中, } x_i \text{ 为图像某像素点的灰度水平}$$

(≤255);  $\bar{x}$  为图像各像素点的灰度水平总和的平均值; N为图像的像素数; S<sup>2</sup>为图像像素点的灰度水平变化方差<sup>[10,11]</sup>。

### 1.9 灰度水平变化方差编程机理

图像使用先前灰度直方图的图像进行计算, 其中N为图像的像素数是固定的10<sup>6</sup>个, 以5个像素点为单位, 切割图像, x<sub>i</sub>是5个像素点的小格子中的像素值的平均值(这个小格子中所有的像素点的值之和除以25), 计算图像的每一个以5个像素点为单位的小格子, 求出S<sup>2</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 扫描电镜图像

由图1、2可以直观的看出, 豆浆酸奶和酸牛奶的结构很象“蜂窝”, 骨架部分可能是蛋白质在酸性条件下, 发生絮状沉淀所造成的。骨架之间的空隙, 正好填充水分, 因此, 尽管酸乳含有大量的水却不易看出来。但是, 当一个完好的酸乳块的某个局部遭到破坏时, 这些孔隙就会暴露出来, 其中的水便流出, 形

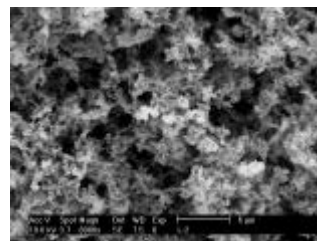


图1 大豆酸奶扫描电镜(8000X)

Fig.1 The image of scanning electron microscope for Soy Based Yoghurt (8000X)

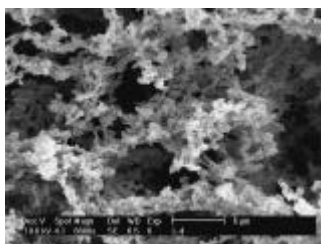


图2 酸牛奶扫描电镜(8000X)

Fig.2 The image of scanning electron microscope for Yoghurt (8000X)

成了乳清析出的现象。这种现象还可以进一步说明, 酸乳中的这些孔隙之间是相通的。

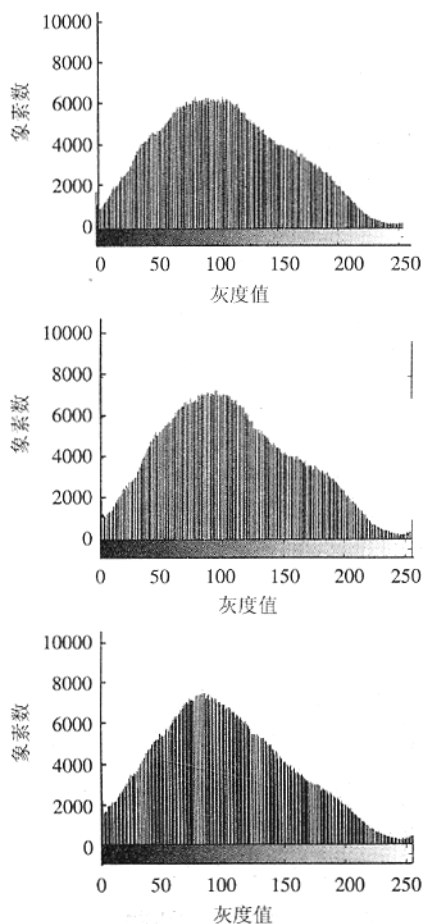


图3 酸牛奶灰度直方图

Fig.3 The image of grey level distribution for Yoghurt

分形是一类破碎而复杂, 但具有自相似性或膨胀对称性的几何对象。自相似是指局部与整体在形态、功能和信息等方面具有统计意义上的相似性。按照分形理论, 分形体内任何一个相对独立的部分(分形元或生成元), 在一定程度上都是整体的再现与缩影。自相似集是局部与整体、局部与局部之间存在结构、功能和信

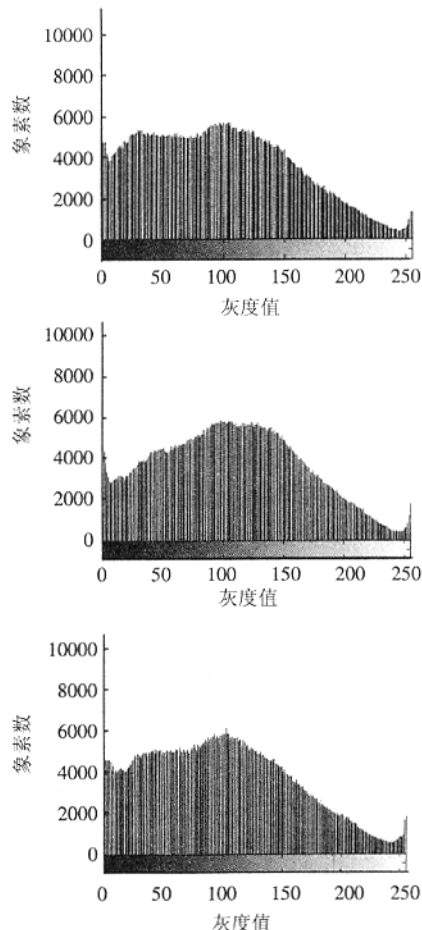


图4 豆浆酸牛奶灰度直方图

Fig.4 The image of grey level distribution for soy based Yoghurt

息方面的自相似性。基于图像灰度直方图分析的阈值分割方法是最直观、应用最普遍的图像分割方法<sup>[12,13]</sup>。该方法是基于以下假设进行的: 图像中像素的灰度在较少几个灰度值附近出现的概率较大。一般认为灰度直方图的每个阈值代表一类目标区域, 而谷值则是从一类目标区域到另一类目标区域的过渡点, 而图像的一维灰度直方图就反映其图像的灰度分布情况<sup>[14,15]</sup>。灰度直方图(histogram)是灰度级的函数, 它表示图像中具有每种灰度级的像素的个数, 反映图像中每种灰度出现的频率。灰度直方图的横坐标是灰度级, 纵坐标是该灰度级出现的频率, 是图像的最基本的统计特征<sup>[16,17]</sup>。

由图可以明显看出豆浆酸牛奶和酸牛奶之间存在着差异, 他们均在灰度值大约 90 达到了峰值, 这说明图像在 90 灰度这个区域左右是图像的主要组成部分, 也就是图像中细腻的蛋白质交联的状态的区域。而酸牛奶的灰度值直方图特征为均匀的单峰, 可以说明酸牛奶在整个灰度范围内是均匀的, 在灰度值较大和较小的范围内没有出现不均匀的堆积或者是孔隙, 而豆浆酸牛奶在灰度值

较低处出现一大一小两个峰,说明豆浆酸奶图像中偏暗的区域较多,也就是蛋白质之间的孔隙较大,这也就造成了豆浆酸奶比酸牛奶容易造成乳清析出的原因。这大致可以说明豆浆酸奶和酸牛奶无论选取扫描电镜图像的任何位置,最终得到的灰度值统计分布是极其相似的,并说明其分布在不同尺度下、不同位置具有自相似的特性。

### 2.3 灰度水平变化方差结果与讨论

表1 图像的灰度水平变化方差  
Table 1 Grey level distribution and variance of SEM

	灰度水平变化方差		平均值	
豆浆酸奶	3.5980	3.5470	3.6930	3.6127
酸牛奶	2.7226	2.7279	2.7368	2.7291

人的肉眼仅能分辨约40级灰度,对灰度图像进行判断往往容易产生较大误差,而对图像进行数字化处理则可在更大灰度级上,如在256阶灰度或真彩色图像水平上对图像进行细微差异的客观比较。对SEM图像,其各像素灰度偏离均值离散程度的灰度水平变化方差大小,较各像素灰度水平的均值及各灰度水平的像素数量分布等更能反映灰度水平离散程度及统计均匀程度<sup>[18]</sup>。

由图像可以看出,豆浆酸奶表面呈现着颗粒和孔隙均比较大,而酸牛奶是极其均匀的交联状态。从图像的灰度水平变化方差来看,两者之间存在着差异,那么, $S^2$ 表示各像素灰度离散及均匀或一致性程度,则灰度水平变化方差越小,即凹凸起伏的变化越小,其图像的均匀或一致性程度就越高,反之亦然。由于灰度方差大小即离散程度不受图像灰度均值及各不同灰度像素点的分布位置的影响,因而可以表征图像的均匀或一致性程度。灰度水平变化方差较大的豆浆酸奶其均匀一致性程度比酸牛奶小,与图像表面特征一致。

### 2.4 分形特征结果与讨论

许多食品都是“柔软固体”,常可以称他们是凝胶或类凝胶。凝胶是介于固体和液体之间的一个中间相。在技术上它被定义为“一种无稳定状态流动的稀

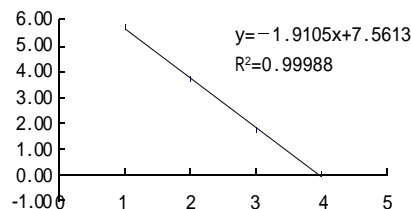


图6 豆浆酸奶 $\log_{10}(N)$ - $\log_{10}(\epsilon)$   
Fig.6  $\log_{10}(N)$ - $\log_{10}(\epsilon)$  for soy based Yoghurt

释体系”。它是由聚合物经共价或非共价键交联而形成的一种网状结构,后者能截留水和其他低相对分子质量的物质。在一个非常短的时间间隔里,凝胶总是表现出纯粹的弹性,而在一个较长的时间间隔里则几乎表现为纯粹的黏性。从结构学角度来看,凝胶拥有一个连续的基质,这个基质是由相互连接的材料与许多间隙溶剂构成<sup>[19]</sup>。

蛋白质的凝胶作用是蛋白质从“溶胶状态”转变为“似凝胶状态”。在适当条件下加热、酸促、酶作用和二价金属离子参与能促使这样的转变。所有这些诱导因素形成一个网状结构,但在过程中所包含的共价和非共价相互作用的类型以及网状结构形成的机制会有显著的不同。在网状结构形成中所涉及到的相互作用主要是氢键、疏水键和静电相互作用。这些作用力的相对贡献取决于蛋白质的类型、加热条件、变形程度和环境条件<sup>[20]</sup>。酸奶类产品具有特有的凝胶结构,那么,这种不同凝胶状态可以利用分形来描述。

应用计盒维数法的基本原理,最终得出酸牛奶的分形维数为1.9268,相关系数为0.9995;豆浆酸奶为1.9105,相关系数为0.9988。两个最终结果线性关系极其显著,分形特征明显。但两者之间差异很小。可以说明酸牛奶和豆浆酸奶对空间的占据程度以及规则有序程度基本相同,同时也可以说明,他们的凝胶状态基本相同。酸牛奶与豆浆酸奶的凝胶类型都属于产酸过程中,蛋白质发生的聚集,从而造成的凝胶状态,当pH处于5.3~6.6的范围内时,蛋白质的粒子的平均大小比较固定。但若pH下降到4.6~5.3,则失去了稳定性,发生聚集,其分子团变大。并且,由于其酸牛奶和大豆酸奶的产酸过程都是相当缓慢的,那么这种聚集也是逐渐进行的,因此,造成了两种凝胶结构的分形维数大致相同的结果。

## 3 结 论

### 3.1 通过扫描电子显微镜观察了酸牛奶和豆浆酸奶的微

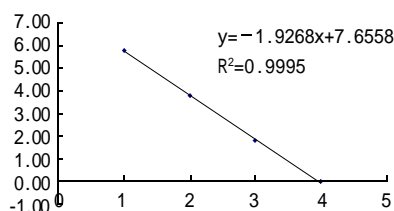


图5 酸牛奶 $\log_{10}(N)$ - $\log_{10}(\epsilon)$   
Fig.5  $\log_{10}(N)$ - $\log_{10}(\epsilon)$  for Yoghurt

观结构,发现其凝胶状态有所不同。

3.2 通过 MATLAB 软件实现了图像的数字化处理,分析了图像的灰度直方图,最终确定了豆浆酸奶和酸牛奶一样具有明显的分形特征 - 自相似性。并建立了一种分析酸奶类产品的交联和孔隙的有效简便方法。

3.3 利用 MATLAB 软件求出图像的灰度水平变化方差,豆浆酸奶为 3.6127,酸牛奶为 2.7291。从而使扫描电镜图像可以用数字来表征其表面状态的颗粒和孔隙的均匀一致程度。

3.4 利用 MATLAB 软件编程以及计盒维数法的原理得出了图像的分形维数,豆浆酸奶为 1.9105,酸牛奶的分形维数为 1.9268。两者从分形维数来看差异并不显著。

#### 参考文献:

- [1] SY lee. Comparison of milk-based and soy milk-based yogurt [J]. Journal of Food Science, 1990, 55(2): 532-538.
- [2] 李锋. 大豆酸奶的研究现状[J]. 中外食品工业, 2003, (9): 58-60.
- [3] 侯自强. 医学诊断数字影像技术[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [4] 李锋. 应用不同大豆蛋白制备大豆酸奶[J]. 食品工业, 2004, (2): 22-25.
- [5] Characterization of Bifidobacterium strains for use in soy milk fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 1998, 39(3): 213-219.
- [6] 蓝芬兰. 扫描电镜分析技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [7] Yano T. Fractal nature of food material [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 1996, 60(5): 739-744.
- [8] A G Marangoni, S Barbut. On the structure of particulate gels - the case of salt-induced cold gelation of heat-denatured whey protein isolate[J]. Food Hydrocolloids, 2000, 14: 61-74.
- [9] Liaok. Hausdorff dimension analysis and digital imaging based quality inspection[J]. American Soc of Agri Eng, 1990, 33(1): 298-303.
- [10] Castleman K R. 数字图像处理[M]. 朱志刚, 林学阁, 石定机, 等译. 北京: 电子工业出版社, 1998. 32.
- [11] 陈彦, 林晓艳, 罗学刚. 以数字处理对魔芋葡甘聚糖膜面特征的初步研究[J]. 化学研究与应用, 2002, 15(5): 557-559.
- [12] Shafiu R M. Physical mean and interpretation of fractal dimensions of fine particles measured by different methods[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 32(4): 447-456.
- [13] 邓志鹏, 许丽敏, 杨杰. 基于直方图相关的图像灰度校正[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 167-169.
- [14] Paul Meakin. Fractal scaling and growth far from equilibrium [M]. Cambridge: Cambridge University Press, c1998.
- [15] Li Jun, Tan Jinlu, Martz Fredric A. Predicting beef tenderness from image texture features[C]. Proceedings of the 1997 ASAE Annual International Meeting. Part 1 (of 3). Minneapolis, MN, USA, 1997. 1-13.
- [16] 张佑生, 彭青松, 汪荣贵. 一种新的数字图像的灰度直方图及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(12): 1655-1658.
- [17] Kazuhiko Shiranita, Kenichiro Hyashi, Akifumi Otsubo, et al. Grading meat quality by image processing[J]. Pattern Recognition, 2000, 33: 97-104.
- [18] Dziuba J. Fractal analysis of caseinate structure[J]. International Dairy Journal, 1999, 9(3-6): 287-292.
- [19] (美) Owen R. Fennema. 食品化学(第三版)[M]. 王璋, 等编译. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
- [20] 陈复生, 李里特, 辰己英三. 分子力对大豆蛋白透明凝胶的作用机理[J]. 食品科学, 2001, 22(10): 27-32.



## 研究发现 NAG 可改善记忆力

由日本烧津化学工业公司进行的研究结果证明: N-乙酰基葡聚糖胺(NAG)具有改善记忆力的功效。

研究以老龄化小鼠为实验动物,对喂普通饲料和添加 5% NAG 饲料的两组小鼠进行从明亮房间到黑暗房间往来活动实验,如果移动到暗室的时间越长,则说明改善记忆力的效果越好。实验结果是:喂普通饲料小鼠等待时间平均为 30s,而添加 NAG 的实验组小鼠等待时间可达到 60s,为对照组的 1 倍。烧津公司测定小鼠大脑中 NAG 含量的结果表明: NAG 添加组动物的 NAG 检出量明显增加。

对脑功能有促进作用的物质已知的有 DHA 和银杏叶提取物两种材料。这次研究的 NAG 是第三种脑功能改善材料,而且 NAG 对骨关节和皮肤美容也都具有改善效果。