

# 籼米溶胶的流变学特性

袁佰华, 李云波, 赵思明\*, 熊善柏  
(华中农业大学食品科学技术学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 以 16 种籼米为原料制作大米溶胶, 研究溶胶的流变学特性, 分析温度、大米品种和游离氨基酸含量对黏度系数、流变指数的影响。结果表明: 剪切应力随剪切速率的升高而增大, 但随温度的升高呈减少趋势。黏度系数( $k$ )和流变指数( $m$ )对温度有依赖性, 黏度系数随温度升高呈下降趋势, 低温时大米溶胶的热稳定较差。品种余红、余赤、金优 402、两优 103 和两优 106 的流变指数稳定, 分子热稳定性较好, 黏度系数随游离氨基酸含量的增加而增大, 流变指数随游离氨基酸含量的增加而降低。

**关键词:** 籼米; 溶胶; 流变特性

## Rheological Properties of Sols from Different Indica Rice Varieties

YUAN Bai-hua, LI Yun-bo, ZHAO Si-ming\*, XIONG Shan-bai  
(College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The rheological properties of sols from 16 different indica rice varieties were determined using a rotational viscometer. The influences of temperature and rice variety on viscosity coefficient and flow behavior index were analyzed. Meanwhile, the correlation between sol characteristics and free amino acid content was investigated. The results showed that the shear stress of indica rice sols was positively correlated with shear rate but negatively correlated with temperature. Both the viscosity coefficient ( $k$ ) and flow behavior index ( $m$ ) were dependent upon temperature. There was a negative correlation between  $k$  and temperature. Rice sols were very unstable at low temperatures. Rice sols from Yuhong, Yuchi, Jinyou 402, Liangyou 103 and Liangyou 106 exhibited a stable flow behavior index and thermally stable molecules. The viscosity coefficient ( $k$ ) increased, whereas the flow behavior index ( $m$ ) declined with increasing free amino acid content.

**Key words:** indica rice; sol; rheology properties

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)13-0075-04

大米粉在过量水分下充分糊化后可以形成溶胶, 流变特性是溶胶的重要特性之一。黏度系数和流变指数是流变学特性的重要参数, 与米制品硬度、黏弹性和咀嚼性等密切相关。籼米中的直链淀粉含量(约 25%~28%)和蛋白质含量(约 8%)较其他类型大米高, 直链淀粉含量高, 分子链较长, 分子链的刚性大, 容易导致其淀粉糊的流动能较大, 长链的直链淀粉分子易于取向, 导致剪切稀化倾向大, 流变曲线的弯曲程度大<sup>[1]</sup>, 蛋白质主要以蛋白体形式填塞在淀粉颗粒之间, 蛋白质吸水降低淀粉水合的有效水量并且通过二硫键的结合形成蛋白质网络, 两者协同提高糊化多相体系的浓度, 增强分散相与黏稠相的相互作用<sup>[2-3]</sup>。

不同品种大米由于直链淀粉、支链淀粉的含量不一样, 以及直链淀粉和支链淀粉的相互作用等对淀粉糊的

流变学特性有较大影响<sup>[4-7]</sup>, 淀粉分子特性和分子构象等的差异, 其流变特性也不一样<sup>[8-10]</sup>。米粉糊黏性随着温度、剪切速率、剪切时间和剪切力的改变而呈动态变化, 表现出非牛顿流体的流变行为<sup>[11-12]</sup>。本实验以 16 种籼米为原料, 制作大米溶胶, 研究溶胶的流变学特性, 为淀粉质凝胶食品的品质控制提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

稻谷为当年收获的籼稻, 实验前用实验砬谷机加工成糙米, 再用实验碾米机碾成白米(碾白 60s)。早籼米由华中农业大学植物科技学院牟同敏老师提供, 晚籼米由湖南金健米业有限公司提供。稻谷的名称和品种类型见表 1。

收稿日期: 2011-06-16

基金项目: 湖北省科技厅米粉专用稻良种技术项目(2009BBB017)

作者简介: 袁佰华(1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。E-mail: y\_b\_h@163.com

\* 通信作者: 赵思明(1963—), 女, 教授, 博士, 研究方向为大分子结构与功能特性。E-mail: zsmjx@mail.hzau.edu.cn

表1 供试籼稻品种的名称和类型  
Table 1 Indica rice varieties used in this study

品种名称	品种类型	品种名称	品种类型
两优 103	早籼	M103s/ 中组 1 号	早籼
两优 106	早籼	M102s/ 中组 1 号	早籼
两优 105	早籼	89-3	晚籼
M103s/20257	早籼	金优 207	晚籼
金优 402	早籼	余红	晚籼
M104s/20257	早籼	丝苗	晚籼
两优 407	早籼	早米	早籼
两优 301	早籼	余赤	晚籼

## 1.2 仪器与设备

JLGJ4.5 型检验砬谷机、JNMJ3 型检验碾米机 浙江台州市粮仪厂；旋转黏度计 日本 Hakkp 公司。

## 1.3 流变特性的测试

利用流变仪测试，在转速为 1、2、4、8、16、32、64、128r/min 时，采用 6g/100mL 淀粉糊于 5~50℃ 条件下测定大米淀粉糊的转矩  $s$ ，取 3 次测定结果的平均值，并计算出各自对应的剪切应力  $\tau$ 。采用幂率定律计算流变指数( $m$ )和黏度系数( $k$ )。

$$\tau = As \quad (1)$$

$$\tau = k \left( \frac{du}{dr} \right)^m = k \gamma^m \quad (2)$$

式中： $\tau$  为剪切应力/(Pa·s)； $s$  为流变仪转矩/(N·m)； $k$  为黏度系数/(Pa·s) $^m$ ； $m$  为流变指数； $u$  为流体的线速率/(m/s)； $r$  为转子至转筒之间任意处半径/m； $\gamma$  为速率梯度或剪切速率/ $s^{-1}$ ，当  $R_i - R_a$  很小时， $\gamma = \frac{u_a}{R_a - R_i}$ ； $u = \frac{0.20944 R_a^2}{R_i^2 - R_a^2} n$ ； $n$  为转速/(r/min)； $u_a$  为转子外径处的线速率/(m/s)； $R_a$  为转子外径/m； $R_i$  为转筒内径/m；对于 MVST 型转子， $R_a = 21\text{mm}$ ， $R_i = 20.8\text{mm}$ ， $A = 3.01$ 。采用非线性回归方法、SAS 8.0 计算黏度系数和流变指数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同品种籼米溶胶的流变学特性

因不同温度条件下的籼米溶胶流变学曲线相似，本实验以 25℃ 溶胶流变曲线为例。由图 1 可知，不同品种籼米溶胶流变曲线均凸向剪切应力轴，为非牛顿流体；剪切应力随剪切速率的增大呈上升趋势，具有假塑性流体特征。若质量浓度不变时，不同品种米粉糊的剪切应力随着温度的增大呈减小趋势，温度升高，链段的活动能增加，分子链间部分氢键断裂，体系的自由积增大，流动性增强，剪切应力减少<sup>[1,13-14]</sup>；当温度不变时，不同品种大米糊的剪切应力随剪切速率升高而增大。

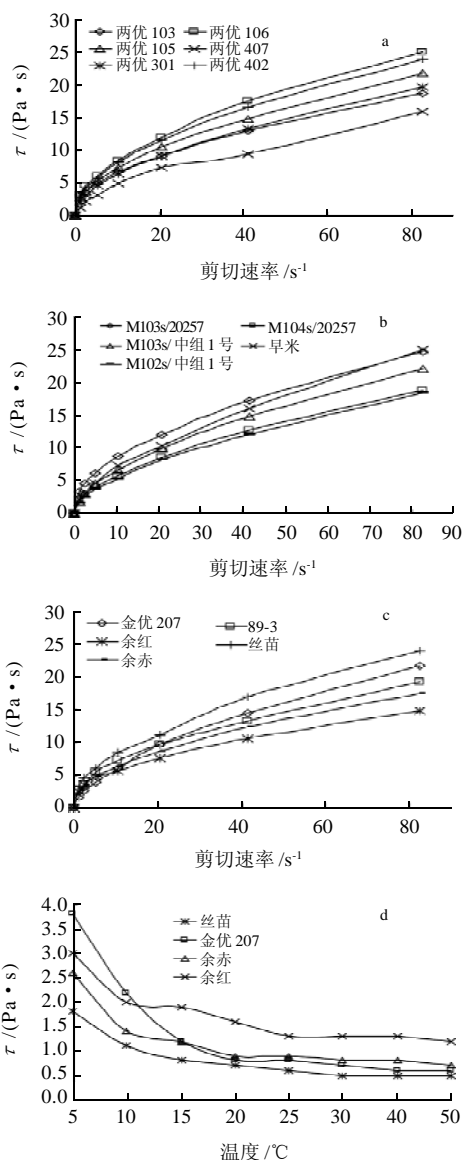


图1 25℃条件下不同品种籼米的流变曲线

Fig.1 Rheological curves of sols from 16 different indica rice varieties at 25 °C

### 2.2 温度对籼米溶胶流变特性的影响

采用幂率定律，通过非线性回归，得出不同温度下的  $m$ 、 $k$ ，见图 2、3。早籼米与晚籼米的  $m$  和  $k$  的新复极差分析结果见表 2，结果发现，早籼米与晚籼米的  $k$  和  $m$  均不存在显著性差异。

表2 25℃条件下早籼米与晚籼米溶胶的  $m$  和  $k$  的新复极差分析  
Table 2 Duncan analysis of viscosity coefficient and flow behavior index for sols from early indica rice and late indica rice at 25℃

指标	早籼米	晚籼米
$k/(\text{Pa} \cdot \text{s})^m$	$2.04 \pm 0.59^a$	$2.23 \pm 0.53^a$
$m$	$0.53 \pm 0.05^a$	$0.49 \pm 0.083^a$

注：同行字母相同表示差异不显著( $P > 0.05$ )。

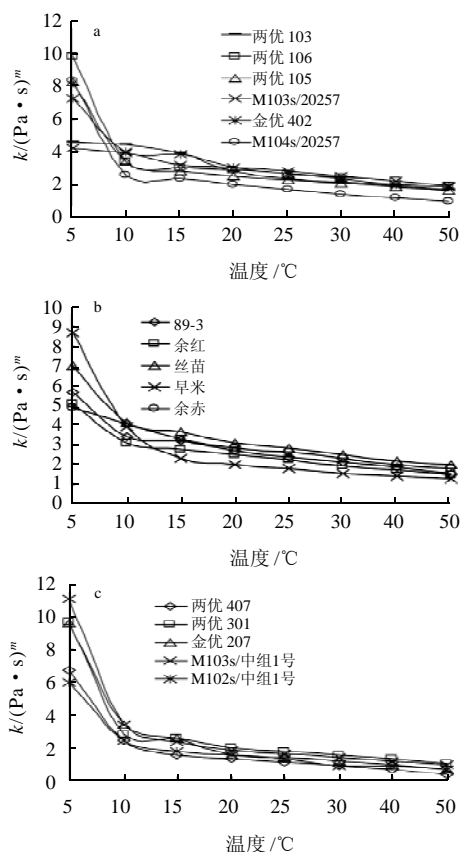


图2 不同温度条件下各籼米溶胶的黏度系数

Fig.2 Viscosity coefficients of sols from different indica rice varieties at different temperatures

由图2可知, 温度、大米品种对溶胶的 $k$ 有较大影响, 各品种籼米溶胶的 $k$ 随温度升高呈下降趋势。这与许永亮<sup>[1]</sup>、胡飞<sup>[15]</sup>等的研究类似, 分析其 $k$ 下降的原因可能是因为温度升高时, 淀粉分子得到充分伸展, 链段柔性增强, 促使淀粉分子运动, 溶液体积发生膨胀, 使每一分子平均占有的体积增大, 流动性增强, 导致淀粉糊的黏度降低,  $k$ 下降<sup>[15-17]</sup>。低温度时,  $k$ 随温度的升高下降速度较快, 表明大米溶胶在低温时热稳定性较差。两优106、两优105、金优402、M104s/20257、两优301、金优207、M103s/中组1号、早米在低温时 $k$ 较大, 随着温度的升高各品种 $k$ 差异不明显。

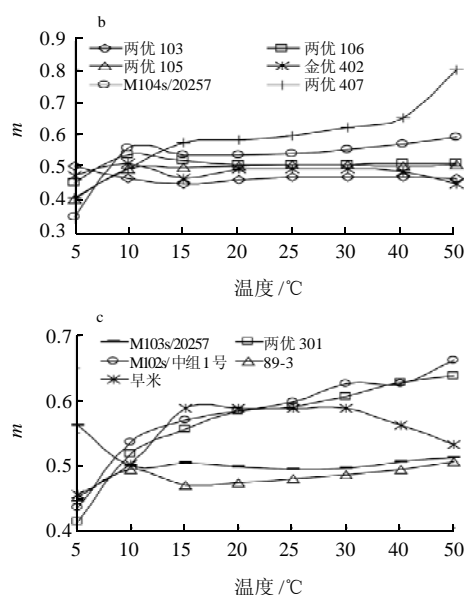
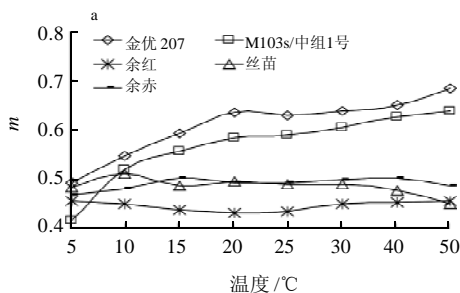


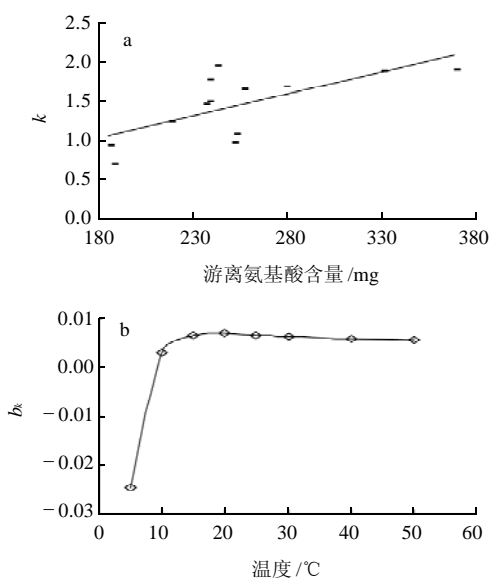
图3 不同温度条件下各籼米溶胶的流变指数

Fig.3 Flow behavior indexes of sols from different indica rice varieties at different temperatures

流体的 $m$ 与分子构象有关, 反映了流体中分子的刚性, 当 $0 < m < 1$ 时,  $m$ 值越小, 液体内部构造越弱, 随着流速的增加, 黏滞阻力增加相对越慢, 分子的构象稳定性越好<sup>[18]</sup>。由图3可知, 各品种籼米溶胶在不同温度条件下的 $m$ 均小于1, 为假塑性流体。20 $^{\circ}C$ 之前, 两优407、金优207、M103s/中组1号、M102s/中组1号、两优301的 $m$ 随着温度的升高而增大, 随温度升高淀粉分子的热运动增强, 分子构象发生较大变化,  $m$ 变化较大。40 $^{\circ}C$ 后, 淀粉分子以得到充分伸展, 随温度的升高,  $m$ 的变化趋于稳定。余红、余赤、金优402、两优103和两优106的 $m$ 随温度升高变化不大, 表明其分子构象的稳定性较好。

### 2.3 籼米溶胶特性与其溶胶游离氨基酸含量的相关性分析

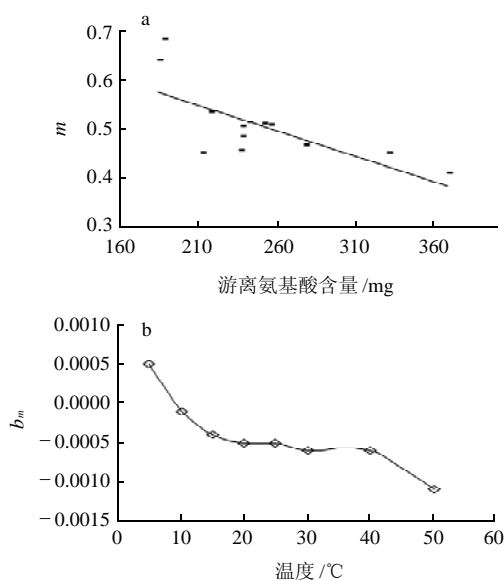
游离氨基酸含量与食品流变学特性密切相关, 对 $k$ 、 $m$ 和原料游离氨基酸含量做相关性分析, 结果发现游离氨基酸含量与二者皆有相关性。由图4a可知,  $k$ 随游离氨基酸含量的增加而增大。由图4b可知, 在较低温度时 $b_k$ 值快速上升, 20 $^{\circ}C$ 后随着温度的升高 $b_k$ 值变化缓慢逐渐趋于平稳状态。由图5a可知,  $m$ 随游离氨基酸含量的增加而降低。由图5b可知, 低温时随着温度的升高 $b_m$ 值下降较快, 在20~40 $^{\circ}C$ 之间时 $b_m$ 值趋于稳定, 40 $^{\circ}C$ 之后随着温度的升高 $b_m$ 值急剧下降。因此可知, 籼米溶胶 $k$ 、 $m$ 受温度影响较大, 低温时溶胶稳定性较差, 这可能是由于温度升高, 包裹在淀粉颗粒外围的蛋白质水解为游离氨基酸, 淀粉与水分子接触面积增大, 淀粉颗粒吸水结构逐渐松散, 直链淀粉渗出, 分子得到充分伸展, 分子柔性增强, 体系流动性增加。



$b_k$  表示黏度系数随游离氨基酸含量的变化率。

图4 游离氨基酸含量与黏度系数关系

Fig.4 Relationship between free amino acid content and viscosity coefficient



$b_m$  表示流变指数随游离氨基酸含量的变化率。

图5 游离氨基酸含量与流变指数关系

Fig.5 Relationship between free amino acid content and flow behavior index

### 3 结论

籼米溶胶为非牛顿流体, 具有假塑性流体的特征, 大米品种、温度对其  $k$  和  $m$  均有较大影响。不同温度条件下籼米溶胶流变曲线相似, 剪切应力随剪切速率的升高而增大, 但不同品种籼米溶胶的剪切应力随温度的

升高呈减少趋势。实验发现  $k$  随温度的升高而下降, 在较低温度范围内  $k$  随温度升高下降速度较快溶胶热稳定性较差, 随着温度的升高各品种  $k$  差异不明显。本实验范围内所用原料籼米溶胶的  $m$  在 0.3~0.8 之间, 20°C 之前,  $m$  随着温度的升高而增大, 40°C 后随温度的升高,  $m$  的变化趋于稳定。余红、余赤、金优 402、两优 103 和两优 106 的  $m$  随温度升高变化不大, 分子构象的稳定性较好。 $k$  随游离氨基酸含量增加呈下降趋势,  $m$  随游离氨基酸含量的增加呈上升趋势。

### 参考文献:

- [1] 许永亮, 程科, 赵思明, 等. 不同品种大米淀粉的流变学特性研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(4): 16-20.
- [2] 谢新华, 李晓方, 肖昕, 等. 糙米中蛋白质对淀粉黏滞性的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2009(11): 20-24.
- [3] MARTIN M, FITZGERALD M A. Proteins in rice grains influence cooking properties[J]. Cereal Sci, 2002, 36: 285-294.
- [4] LII C, TSAI M, TSENG K. Effect of amylase content on therheological properties of rice starch[J]. Cereal Chem, 1996, 73(4): 415-420.
- [5] SVEGMARK K, KIDMAN S, HERMANSSON A M. Molecular structure obtained from mixed amylase and Potato starch dispersions and their rheological behavior[J]. Carbohydr Polym, 1993, 22: 19-29.
- [6] 赵思明, 熊善柏, 张声华. 稻米淀粉糊老化过程的流变学和质构特性[J]. 农业工程学报, 2002, 21(2): 161-165.
- [7] RAINA C S, SINGH S, BAWA A S, et al. Rheological properties of chemically modified rice starch model solu[J]. Journal of Food Process Engineering, 2006, 29(2): 134-148.
- [8] JACOBSON M R, OBANNI M, BEMILLER J N. Retrogradation of starch from different botanical sources[J]. Cereal Chem, 1997, 74(5):511-518.
- [9] YUAN R C, THOMPSON D B. Rheological and properties of aged starch paste from three waxy maize genotypes[J]. Cereal Chem, 1998, 75 (1): 117-123.
- [10] 李坚斌, 李琳, 陈玲, 等. 淀粉糊流变学特性研究新进展[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 689-691.
- [11] NGUYEN Q D, JENSEN C T B, KRISTENSEN P G. Experimental and modeling studies of the flow properties of maize and waxy maize starch pastes[J]. Chem Eng J, 1998, 70: 165-171.
- [12] DJAKOVIC L J, SOVILJI V, MILOSEVIC S. Rheological behaviour of thixotropic starch[J]. Starch/Stärke, 1990, 42: 380-385.
- [13] 荣建华, 史俊丽, 张正茂, 等. 超微细化大米淀粉流变学特性的研究[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(3): 73-76.
- [14] 甘淑珍, 付一帆, 赵思明. 小麦淀粉糊化的影响因素及黏度稳定性研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(2): 36-39.
- [15] 胡飞, 李平凡, 陈玲. 微细化马铃薯淀粉流变性质的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2002(7): 41-43.
- [16] 马永强, 吴晓丹, 李志江, 等. 萌发玉米淀粉流变学特性的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2004, 20(5): 590-592.
- [17] DINTZIS F R, BAGLEY E B. Shear-thickening and flow induced structure in a system of DMSO containing waxy maize starch [J]. Journal of Rheology, 1995, 39: 1399-1409.
- [18] 李里特. 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.