

酒醅发酵过程中温度变化曲线的实时检测及其数学模型建立

黄治国, 罗惠波, 程铁轺, 李光辉

(四川理工学院酿酒生物技术及应用四川省重点实验室, 四川 自贡 643000)

摘要: 温度是影响微生物发酵的重要因素之一, 酒醅温度的变化是由环境温度(主要是地温)和窖池微生物生长代谢共同作用的结果。本试验利用窖池温度检测系统对川南某酒厂3口窖池的酒醅温度进行实时检测, 绘制出温度变化曲线, 并拟合出数学模型。结果表明, 温度变化曲线基本符合“前缓、中挺、后缓落”的传统经验。高斯拟合对温度数据的拟合效果较好, 表明利用温度曲线模型预测整个发酵过程中温度曲线的变化趋势是可行的。

关键词: 白酒; 酒醅; 发酵; 温度; 数学模型

中图分类号: TS262.3; TS261.4; TP27

文献标识码: A

文章编号: 1001-9286(2008)10-0020-03

Real-time Detection & Establishment of Mathematical Model of Temperature Change Curve of Fermented Grains in Fermentation Process

HUANG Zhi-guo, LUO Hui-bo, CHENG Tie-yuan and LI Guang-hui

(Liquor-making Biotechnology & Application Key Lab of Sichuan Province, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China)

Abstract: Temperature is one of the important influencing factors in microbial fermentation. Temperature change of fermented grains is determined by collaboration of environmental temperature (mainly land temperature) and microbial growth and metabolism in pits. In the experiments, real-time detection on fermented grains temperature of three pits in the distillery (located in south Sichuan) was done by use of pits temperature detection system, then temperature change curve was described and the relative mathematical model was established. The results showed that the temperature change curve was basically in accord with the description by traditional experience (slow culture in prior stage, strong culture in medium stage, and declining culture in late stage). Besides, Gaussian Fitting had satisfactory fitting effects on temperature data, which indicated that the use of temperature curve model to forecast the change trend of temperature curve in the whole fermentation process was feasible. (Tran. by YUE Yang)

Key words: liquor; fermented grains; fermentation; temperature; mathematical model

微生物的生命活动都是由一系列生物化学反应组成的, 而这些反应受温度影响又极其明显, 故温度成了影响微生物生长繁殖的最重要因素之一^[1]。白酒是以大曲、酒母等为糖化发酵剂, 原料经蒸煮糖化、发酵、蒸馏、贮存、勾调而成的蒸馏酒^[2]。酒质的优劣主要由窖内微生物的种类、数量及发酵状况所决定。温度是影响微生物发酵极其重要的因素之一, 窖池中温度的变化是由环境温度(主要是地温)和窖池微生物进行生长代谢时共同作用的结果。在白酒的生产实践中, 温度观测是酒醅入窖后了解发酵状况的最重要的手段, 因此, 对温度精确而连续的观测能够更好地指导生产实践。有关发酵温度方面的研究已有相关报道^[3~5]。本文通过对窖池温度的连续观测来分析温度与窖池微生物发酵以及所产白酒

品质之间的相互联系, 并对数据进行优化拟合, 得出窖池发酵过程的温度模型公式, 为窖池发酵控制研究提供基础数据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

川南某酒厂酿酒车间3口老窖池(1980年建)。

1.2 试验仪器

窖池温度检测系统: 由无纸记录仪与温度探头组成, 自行设计, 昆仑工控代为加工。

1.3 试验方法

选择3口窖池(酒醅入窖时间相隔1d)。利用温度探头对窖池中心区域和周围区域(距窖池侧壁20cm左

基金项目: 四川省应用技术研究与开发项目资助(07JY029-026)。

收稿日期: 2008-08-07

作者简介: 黄治国(1978-), 男, 博士, 研究方向为生物技术。

右)的上层(距窖顶 0.5 m 深处)、中层(距窖顶 1.0 m 深处)、下层(距窖顶 1.5 m 深处)共 6 个点的酒醅温度进行实时监测,从封窖开始直到起窖为止。

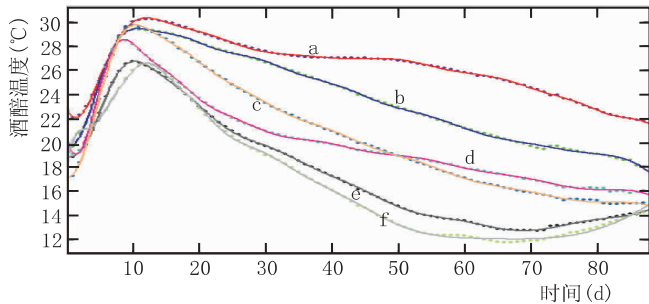
1.4 数据分析

利用 MATLAB 软件拟合酒醅温度的数学模型。

2 结果与分析

2.1 1号窖池各层酒醅温度变化曲线

1号窖池酒醅温度从入窖开始到 10 d 左右的时间不断升高,各检测点升温幅度相差不大;入窖 10 d 左右升温至最高峰,各检测点温度存在差异,中心区域下层酒醅温度最高,达 30.19 °C,周围区域上层酒醅温度最低,仅 26.49 °C;然后各检测点温度开始下降,窖池中心区域的酒醅温度下降幅度小于周围区域,底层酒醅下降幅度小于上层酒醅。在整个发酵过程中 1 号窖池各监测点酒醅温度的数量关系为: $T_a > T_b > T_c > T_d > T_e > T_f$,但是从 51 d 左右开始 $T_d > T_c$ (图 1)。



a: 中心区域下层酒醅温度变化曲线; b: 中心区域中层酒醅温度变化曲线; c: 周围区域中层酒醅温度变化曲线; d: 周围区域下层酒醅温度变化曲线; e: 中心区域上层酒醅温度变化曲线; f: 周围区域上层酒醅温度变化曲线

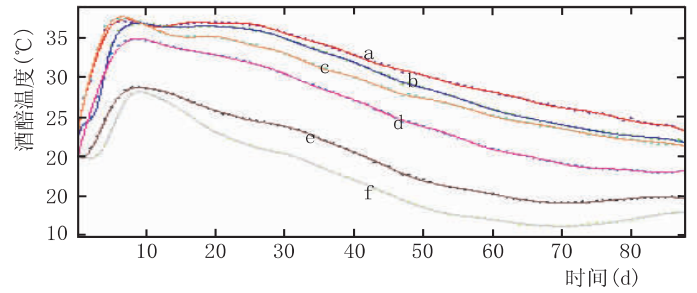
图 1 1号窖池各层酒醅温度变化曲线拟合图

2.2 2号窖池各层酒醅温度变化曲线

2号窖池 6 个监测点的酒醅温度从入窖开始到 8 d 左右升温至最高峰, a、b、c 曲线在 8 d 到 20 d 之间有一个短暂回落后又升温至第 2 高峰, 此后下降趋势与其他各层相似, 在 70 d 后 e、f 曲线又有小幅度回升。2号窖池各监测点酒醅温度数量关系: $T_a > T_b > T_c > T_d > T_e > T_f$ (图 2)。

2.3 3号窖池各层酒醅温度变化曲线

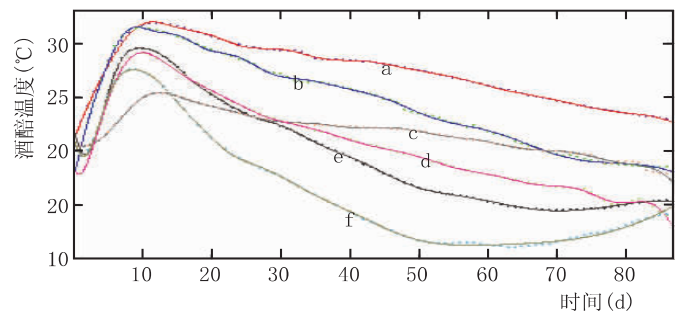
3号窖池 6 个监测点的酒醅温度与 2 号窖池相似, 也是在第 8 天左右升温至最高峰, 然后开始下降, 窖池中心区域上层和周围区域上层降温幅度最大, 中心区域底层和周围区域底层降温幅度最小, 中心区域中层和周围区域中层降温幅度相差不大。从入窖开始直到 14 d 左右, c 曲线低于其他各曲线; 14~25 d, c 曲线高于 f 曲线, 但低于其他曲线; 30 d 之后, 开始高于 d、e、f 曲线, 但仍低于 a、b 曲线。3号窖池各监测点温度数量关系是:



a: 中心区域下层酒醅温度变化曲线; b: 中心区域中层酒醅温度变化曲线; c: 周围区域下层酒醅温度变化曲线; d: 周围区域中层酒醅温度变化曲线; e: 中心区域上层酒醅温度变化曲线; f: 周围区域上层酒醅温度变化曲线

图 2 2号窖池各层酒醅温度变化曲线拟合图

$T_a > T_b > T_d > T_e > T_f$ (图 3)。



a: 中心区域下层酒醅温度变化曲线; b: 中心区域中层酒醅温度变化曲线; c: 周围区域下层酒醅温度变化曲线; d: 周围区域中层酒醅温度变化曲线; e: 中心区域上层酒醅温度变化曲线; f: 周围区域上层酒醅温度变化曲线

图 3 3号窖池各层酒醅温度变化曲线拟合图

2.4 酒醅温度变化曲线的数学模型拟合

对 3 口窖池的各层酒醅发酵温度变化曲线均进行了高斯拟合, 结果发现: 高斯曲线模型对数据拟合效果非常好, 3 口窖池各层温度均满足高斯方程(图 1、图 2、图 3), 只是具体参数有所不同, 但在开始阶段到发酵 2 d 左右的一小段曲线不符合原始数据(图 4), 限于文章篇幅, 此处只列出 1 号窖池中心区域底层酒醅温度曲线的高斯方程如下:

General model Gauss8:

$$f(x) = a_1 \times \exp\{-[(x-b_1)/c_1]^2\} + a_2 \times \exp\{-[(x-b_2)/c_2]^2\} + a_3 \times \exp\{-[(x-b_3)/c_3]^2\} + a_4 \times \exp\{-[(x-b_4)/c_4]^2\} + a_5 \times \exp\{-[(x-b_5)/c_5]^2\} + a_6 \times \exp\{-[(x-b_6)/c_6]^2\} + a_7 \times \exp\{-[(x-b_7)/c_7]^2\} + a_8 \times \exp\{-[(x-b_8)/c_8]^2\}$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a_1 &= 15.81 \quad (-193.6, 225.2) & b_1 &= 10.88 \quad (-6.381, 28.15) \\ c_1 &= 5.263 \quad (-19.86, 30.39) \\ a_2 &= 14.69 \quad (-135.1, 164.5) & b_2 &= 17.18 \quad (-7.832, 42.19) \\ c_2 &= 6.803 \quad (-22.08, 35.68) \\ a_3 &= 13.88 \quad (-144.9, 172.6) & b_3 &= 5.306 \quad (-3.438, 14.05) \\ c_3 &= 4.531 \quad (-17.98, 27.04) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_4 &= 10.8 \quad (-83.33, 104.9) & b_4 &= 25.87 \quad (-1.063, 52.81) \\
 c_4 &= 9.096 \quad (-25.54, 43.73) \\
 a_5 &= 9.061 \quad (-110.3, 128.4) & b_5 &= 36.96 \quad (-14.72, 88.64) \\
 c_5 &= 12.85 \quad (-43.55, 69.25) \\
 a_6 &= 14.4 \quad (-56.7, 85.49) & b_6 &= 0.3552 \quad (-5.037, 5.748) \\
 c_6 &= 3.617 \quad (-2.063, 9.297) \\
 a_7 &= 8.753 \quad (-227.9, 245.4) & b_7 &= 55.62 \quad (9.878, 101.4) \\
 c_7 &= 24.08 \quad (-304, 352.2) \\
 a_8 &= 31.84 \quad (-1830, 1893) & b_8 &= 132.7 \quad (-3549, 3814) \\
 c_8 &= 48.43 \quad (-2519, 2616)
 \end{aligned}$$

Goodness of fit: SSE: 1.123 R-square: 0.9994 Adjusted R-square: 0.9992 RMSE: 0.138

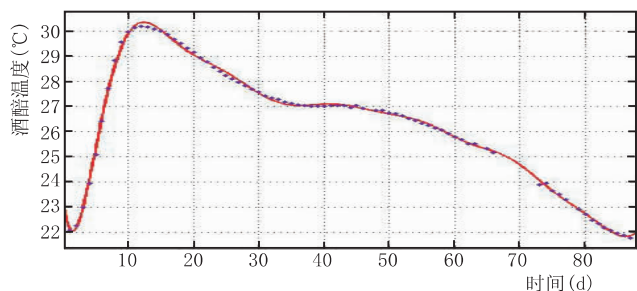


图4 1号窖池中心区域1.5m处酒醅温度曲线拟合图

3 讨论

3.1 窖池发酵过程中温度与窖池微生物之间的相互联系

温度是影响微生物生长最重要的因素之一,温度对微生物的影响分为直接效应和间接效应两方面:直接效应包括影响微生物的生长速率、酶活力、细胞组成和营养需求等;间接效应包括影响溶质分子的溶解性、离子的运输和扩散、细胞膜渗透压和表面张力等^[6]。温度对微生物的生长和脂质以及其他一些代谢活动均有影响^[7],例如白酒发酵中:当温度升高,又有酒精存在时,酵母的发酵力会受到很大抑制。较高温度会使酵母发酵到一定程度就停止,较低温度发酵,酵母的酶活力不易破坏,发酵持续性强,出酒率高^[8]。在发酵过程中由微生物的代谢所产生的成分主要有挥发性醇类、酯类、羰基化合物、有机酸、硫化物、氨基酸类等,这些物质构成了白酒酒体的主体香味成分。

窖池中热量的产生来源于窖池微生物的呼吸热和发酵热。在发酵过程中,假如以酒醅含60%的水分计算,当酒醅淀粉浓度由于发酵而降低1%时,酒醅温度实际升高约2°C^[9]。在酵母发酵中,发酵温度的高低与酵母的发酵力有着密切的关系,酵母乙醇发酵中所释放的226 kJ自由能除67 kJ(29%)用于ATP外,其余能量以热能的形式散发^[10]。本试验研究发现:酒醅发酵开始阶段各层酒醅温度升高且升温迅速,可能是由于在发酵的初始阶段霉菌过快耗尽酒醅中的氧气,造成了厌氧环

境,窖内酒醅中的酵母菌迅速生长并进入稳定期,过早进行酒精发酵,酒精发酵是个放热过程且窖内微生物呼吸也产生热量,导致窖池升温迅速。

进入稳定期后,在相当长一段时间内各种微生物都保持相对平衡,后期随着窖池中各种营养物质消耗殆尽,剩余的少量能源物质利用难度加大,窖池中生态环境变得更加恶劣,比如乙醇浓度、酸度增大,逐渐开始不适宜酵母菌等微生物的生长,窖池微生物大量死亡,产生的发酵热和呼吸热随之减少,温度逐渐降低。后期温度有一个小幅度的升温过程,可能是由于窖池中某些微生物逐渐适应了酸性环境,并且由于前一时间段内各种窖池微生物大量死亡,剩余的营养物质虽然很少但也能够维持一定数目微生物的生长。在整个窖池发酵过程中,温度与微生物群落之间的关系是相互促进和相互制约的。前面的分析可以看出,窖池微生物在不同阶段内进行不同生理活动时的温度需求不完全相同,因此微生物处于不同的生长阶段、不同的发酵速度和合成不同的代谢产物往往可以通过外部环境温度表现出来。换句话说:外部环境温度能够一定程度的反应内部发酵状况,同时窖池整个发酵过程中不同时间段内占主导地位的微生物种群是不相同的。因此,从某种意义上讲,温度是整个发酵过程中窖池微生物主酵母菌变化的重要影响因素之一,并且温度可能是前期影响窖池微生物群落的最主要因素。

本试验的3口窖池酒醅温度曲线的变化趋势存在差异,可能是由多种原因造成的。①人工操作的差异,本试验中的3口窖池不是同一班次,可能存在操作上的差异,最终影响酒醅温度曲线;②窖池的差异,老窖和新窖的差异,老窖池中窖泥微生物的种类和数量都更加丰富,窖泥中微生物的种类和数量(自然驯化的)越丰富,对窖池发酵的正面影响作用就越大,窖池的发酵状况就越好,温度曲线的走势也就应该更好。

3.2 数据处理和曲线拟合

本试验利用MATLAB软件对酒醅温度进行了高斯拟合,发现高斯函数能够对温度数据的拟合效果较好,而且随着次数的升高,拟合程度越好,与原始数据非常接近,不过,在曲线的开始阶段,曲线走势与原始数据不相符合。最后得到的3口窖池的各层温度都能较好地满足函数:

$$f(x) = a_1 \times \exp\left\{-\left[\frac{(x-b_1)}{c_1}\right]^2\right\} + a_2 \times \exp\left\{-\left[\frac{(x-b_2)}{c_2}\right]^2\right\} + a_3 \times \exp\left\{-\left[\frac{(x-b_3)}{c_3}\right]^2\right\} + a_4 \times \exp\left\{-\left[\frac{(x-b_4)}{c_4}\right]^2\right\} + a_5 \times \exp\left\{-\left[\frac{(x-b_5)}{c_5}\right]^2\right\} + a_6 \times \exp\left\{-\left[\frac{(x-b_6)}{c_6}\right]^2\right\} + a_7 \times \exp\left\{-\left[\frac{(x-b_7)}{c_7}\right]^2\right\} + a_8 \times \exp\left\{-\left[\frac{(x-b_8)}{c_8}\right]^2\right\}$$

高斯函数能够很好地拟合温度数据,因此,通过检测几个有效温度点,确立高斯方程,然后利用高斯方程,可以对整个发酵过程中酒醅温度变化进行预测。

(下转第25页)

在白酒评价中确定的比例,得到模糊综合评判中的隶属度,根据模糊推理,利用式(5)进行模糊评判。

例如,以一款浓香型白酒的典型代表泸型白酒为例,选择品酒人员:专业品酒师3人,教授1人,副教授2人,研究生4人,共10人。

根据主要感官质量指标模糊量化,得到评分标准,见表2。

表2 主要感官质量指标模糊量化评分标准

项目	优	良	中	差
色泽	2	5	2	1
香味	4	3	2	1
口味	5	3	2	0
风格	3	4	3	0

根据评价体系,因素集为 $U=\{\text{色泽,香味,口味,风格}\}$,决断集为 $V=\{\text{优,良,中,差}\}$,由评分标准表格记录得到评价矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

这里根据色泽、香味、口味、风格在白酒评价中确定的比例,在评分时色泽占10%,香味占25%,口味占50%,风格占15%,则可以得到模糊综合评判中的隶属度为 $A=[0.1 \ 0.25 \ 0.5 \ 0.15]$,综合评定计算:

$$B=A \cdot R =$$

$$[0.1 \ 0.25 \ 0.5 \ 0.15] \cdot \begin{bmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$=[0.5 \ 0.3 \ 0.2 \ 0.1]$$

归一化得:[0.46 0.27 0.18 0.09],按照最大隶属原则,通过模糊综合评判,得到此样品酒的综合质量评定为优。

3 结束语

由于白酒物质构成含量的复杂多样和模糊性,对白酒物质构成含量的关系、非色谱成分在白酒中扮演的作用等研究尚待进行,鉴于目前主要是人从整体上通过感官来评定白酒,而人类感觉器官的灵敏度和工作状态受环境、时间、工作程序、工作量、心理活动等诸多因素的影响,其分析结果往往带有一定的主观性。为了使白酒质量的评价结果更客观,使分析结果更精确,所以提出了模糊综合评价方法,该方法计算简单,既利用了感官评价结果,又考虑了白酒物质构成含量的模糊性。实验结果也证明了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] 李维青.白酒的香气与香型[J].酿酒,2007,34(2):5-7.
- [2] 徐成勇,沈怡方,等.白酒香味成分研究进展[J].酿酒科技,2002,111(3):38-40.
- [3] 陈华,等.中国白酒香型的化学模式识别(II)-聚类分析[J].食品科学,2000,21(8):37-39.
- [4] 马荣山,刘婷,郭威,等.应用模糊多属性决策法评定酱香型白酒的感官质量[J].酿酒科技,2007,161(11):34-38.
- [5] 晋检.白酒的优劣鉴别[J].中国商检,1998,(8):23.
- [6] 谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其在应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2000.
- [7] 曾黄麟.智能计算[M].重庆:重庆大学出版社,2004.

(上接第22页)

4 结论

本试验利用MATLAB对曲线进行拟合,结果表明,高斯拟合对温度数据的拟合效果非常好,能够很好地符合3口窖池的原始数据,可以为提高白酒质量、产量以及改善发酵条件和工艺操作提供一定的数据参考。但曲线的拟合只是最大程度上的逼近原始数据,因此可能存在其他更好的数学模型适合窖池发酵的温度变化趋势。而且由于不同地区不同季节不同窖池以及窖龄的差异,因此我们得到的温度模型公式也有其局限性。

参考文献:

- [1] 周德庆.微生物学教程[M].北京:高等教育出版社,2003.160-161.
- [2] 康明官.白酒工业手册[M].北京:中国轻工业出版社,1993.1-3.
- [3] 唐玉明,任道群,姚万春,卓毓崇,何世兴,云敏.酱香型酒糟

醅堆积过程温度和微生物区系变化及其规律性[J].酿酒科技,2007,155(5):54-58.

- [4] 孙家芳.关于甲烷菌与己酸菌发酵调节发酵温度加快新窖老熟的探讨[J].山东食品发酵,2003,131(4):23-24.
- [5] 修志龙,邵惠鹤.微生物发酵过程的温度控制[J].控制工程,2005,(S2):34-36.
- [6] Lansing M. Presencott etc. Microbiology[M]. Mcgraw-Hill Companies, Inc. 2002, 125.
- [7] 施邑屏.温度与微生物.微生物学通报[J].1982,(6):41-44.
- [8] 沈怡方.白酒生产技术[M].北京:中国轻工业出版社,1998.452-458.
- [9] 宋钢.微生物代谢与香气成分[J].中国酿造,2006,(2):64-68.
- [10] 王镜岩,沈同.生物化学[M].北京:高等教育出版社,2003.63-194.