

糖化过程中阿拉伯木聚糖溶解及内切木聚糖酶随机进攻预测模型的建立 Modeling for Prediction of Arabinoxylans Solubilization and Endo-xylanase Random Attacking During Mashing

陆 健^{1*} 李 胤²

LU Jian^{1*} and LI Yin²

1. 江南大学工业生物技术教育部重点实验室, 无锡 214036

2. 江南大学生物工程学院, 无锡 214036

1. The Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China

2. School of Biotechnology, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China

摘 要 建立了糖化过程中阿拉伯木聚糖溶解及内切木聚糖酶随机进攻的预测模型, 希望通过此模型能预测在不同初始条件和参数设置下糖化过程中阿拉伯木聚糖的浓度, 以减少其在酿造过程中的负面作用。结果显示, 此模型预测麦汁中阿拉伯木聚糖浓度的误差在 -9.5% 到 $+13.6\%$ 之间。工业验证模型的误差要大于实验室条件下的误差, 分别为 16.8% 和 17.9% 。仿真结果表明, 麦汁中阿拉伯木聚糖的浓度随糖化初始温度的升高而增加, 而延长糖化初始时间能降低阿拉伯木聚糖的含量。并且麦芽中内切木聚糖酶活对麦汁中阿拉伯木聚糖的浓度的影响要远远小于麦芽中阿拉伯木聚糖的初始值。

关键词 模型, 阿拉伯木聚糖, 内切木聚糖酶, 糖化

中图分类号 Q55 文献标识码 A 文章编号 1000-3061(2005)04-0584-06

Abstract A model describing the solubilization of arabinoxylans and degradation by endo-xylanase random attacking during mashing was developed. The model was expected to predict the arabinoxylans concentration in wort at the settings of different initial value and mashing parameters for diminishing the negative effects of arabinoxylans on brewing. Results showed that the modeling errors range for the final concentration of arabinoxylans in wort was -9.5% to $+13.6\%$. The model prediction accuracy for industrial scale mashing process was lower than that in laboratory scale. The errors were given 16.8% and 17.9% , respectively. The simulation results showed that arabinoxylans concentration was increased with the increase of mashing-in temperature, but it was decreased with prolonging the mashing-in time. The effect of initial arabinoxylans in malt on arabinoxylans concentration in wort was more remarkable than that of endo-xylanase activity in grist.

Key words model, arabinoxylans, endo-xylanase, mashing

大麦麦芽中最主要的非淀粉质多糖是阿拉伯木聚糖和 β -葡聚糖^[1]。阿拉伯木聚糖在发芽过程中得到部分降解, 在糖化过程中受麦芽中内切木聚糖酶降解的作用得到进一步降解^[2]。发芽状况较差的麦芽中, 阿拉伯木聚糖得不到充分的降解。因此, 在酿

造过程中阿拉伯木聚糖会引起一系列问题, 比如低浸出率, 增加麦汁粘度^[3], 降低过滤速度^[4], 堵塞纯生啤酒过滤膜, 甚至造成成品啤酒的混浊^[5]。

过去的研究中, 我们已对大麦发芽、糖化及酿造过程中阿拉伯木聚糖的降解进行了深入的研究^[6]。

进而通过对阿拉伯木聚糖溶解和降解机制的分析,优化糖化参数,从而有效地控制了阿拉伯木聚糖对酿造的负面作用^[7]。然而,由于不同品种和品质的大麦中阿拉伯木聚糖的含量大相径庭,不同企业糖化曲线的差异导致内切木聚糖酶失活程度不同,过去对参数优化的研究就有一定的局限性。因此,我们希望建立数学模型系统以研究糖化过程中阿拉伯木聚糖的溶解及降解。

本实验建立了预测糖化过程中阿拉伯木聚糖的溶解和降解及麦芽内源内切木聚糖酶随机进攻的模型,在给定不同的糖化曲线和初始麦芽条件的情况下能预测出最终糖化麦汁中阿拉伯木聚糖的浓度。在实验室条件下,通过 8 种等温糖化和 1 种升温糖化建立了模型,采用 6 种升温曲线对模型进行了验证,并在两家啤酒公司进行了工业验证,最终讨论了改变麦芽初始条件和升温曲线对结果的影响。

1 材料和方法

1.1 麦芽

实验室糖化采用 4 种商品麦芽:Harrington(加拿大),Kendall 和 Schoone(澳大利亚),KA4B(中国)。

1.2 糖化

模型的建立和评价选用 Harrington 麦芽并采用 15 种不同的糖化曲线:8 种等温糖化(40℃,45℃,48℃,52℃,55℃,60℃,65℃,70℃)和 7 种升温糖化(升温曲线 1~7 表 1)。8 种等温糖化和 1 种升温糖化(升温曲线 7)用于模型的参数估计,6 种升温糖化(升温曲线 1~6)用于模型的验证。

工业规模的验证在三得利(昆山)啤酒酿造公司

和河南金星啤酒厂进行,糖化曲线分别为曲线 A 和曲线 B(表 1)。

表 1 糖化曲线

Table 1 The mashing profiles

No.	Mashing programme	Temperature increase rate
1	50℃/40min, 62.5℃/30min, 70℃/10min, 78℃/12min	1℃/min
2	45℃/20min, 63℃/35min, 72℃/35min, 80℃/12min	2℃/min
3	55℃/20min, 63℃/35min, 72℃/35min, 80℃/12min	2℃/min
4	45℃/40min, 63℃/25min, 72℃/25min, 80℃/12min	2℃/min
5	50℃/30min, 66℃/45min, 76℃/10min	2℃/min
6	50℃/30min, 70℃/45min, 80℃/30min	2℃/min
7	45℃/15min, 63℃/30min, 72℃/30min, 80℃/12min	2℃/min
A	45℃/30min, 52℃/10min, 63.5℃/60min, 76℃/10min	0.5℃/min
B	47℃/40min, 52℃/20min, 65℃/60min, 78℃/5min	1℃/min

1.3 分析方法

糖化过程中间隔 5~20min 取样,迅速冷却到 4℃以防止酶的进一步作用和糖的浸出。

内切木聚糖酶的测定采用 DNS 方法^[8]。

阿拉伯木聚糖的测定采用气相色谱法,按 Schwarz 等报道的方法测定糖化醪中阿拉伯木聚糖的含量^[9]。

1.4 模型描述

图 1 为谷物中阿拉伯木聚糖的溶解和受内切木聚糖酶作用降解示意图。大麦麦芽中大多数的阿拉伯木聚糖是不可溶的,但在温度升高时,部分变为热水可溶性的阿拉伯木聚糖。糖化过程中,阿拉伯木聚糖和内切木聚糖酶从谷物中溶解到糖化醪中。内切木聚糖酶降解阿拉伯木聚糖为 β -寡聚木糖,但随着糖化温度的升高,内切木聚糖酶又逐渐失活。

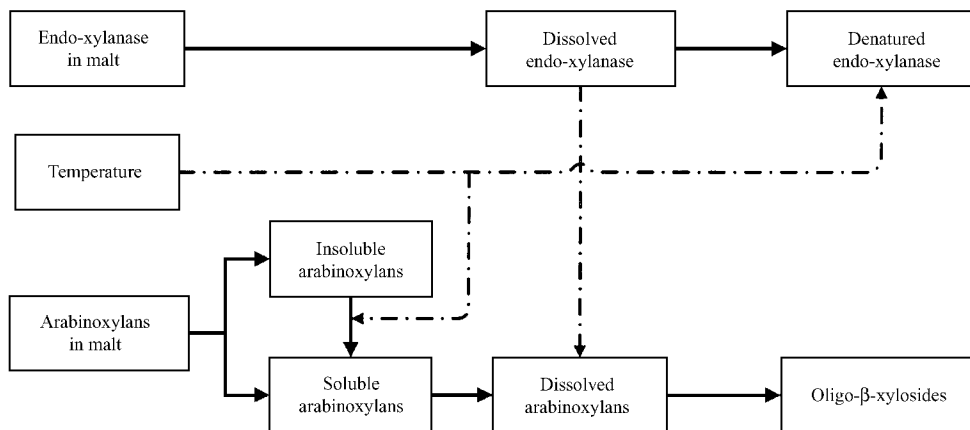


图 1 谷物中阿拉伯木聚糖的溶解和受内切木聚糖酶作用降解示意图

Fig.1 The structure of the model describing dissolution and degradation of arabinoxylans

Dashed lines stand for an influence and solid lines for mass flow.

1.4.1 内切木聚糖酶的溶解和失活 :内切木聚糖酶的溶解和失活的模型与 Marc 等建立的糖化过程中 α -淀粉酶的溶解和失活模型类似^[10]。

$$\frac{dX_g}{dt} = -H_x \frac{M}{V_g} (X_g - X_w) \quad (1)$$

$$\frac{dX_w}{dt} = H_x \frac{M}{V_w} (X_g - X_w) - K_v(T)X_w \quad (2)$$

糖化时,内切木聚糖酶以某一速率从谷物中溶解到糖化醪中,达到某一平衡状态。假设在谷物中内切木聚糖酶受谷物的保护不会失活,而在糖化醪中随温度的升高而失活。酶失活速率满足阿累尼乌斯(Arrhenius)方程。

$$K_v(T) = K_{w,0} \times e^{-E_{kx}/RT} \quad (3)$$

在糖化刚开始,设所有内切木聚糖酶都存在于谷物中,糖化醪中没有酶活。因此,初始条件满足以下方程:

$$X_g(0) = X_0 \quad (4)$$

$$X_w(0) = 0 \quad (5)$$

根据等温糖化实验 45℃ 下的等温糖化最终使木聚糖酶活达到最大值 $X_{w,eq}$,此时谷物中的酶活与糖化醪中的酶活达到平衡。因此谷物中初始酶活为:

$$X_0 = \frac{X_{w,eq}(V_g + V_w)}{V_g}$$

1.4.2 阿拉伯木聚糖的溶解和降解 :阿拉伯木聚糖的溶解和降解应满足以下方程:

$$\frac{dC_g}{dt} = -H_c \frac{M}{V_g} (C_g - S_g(T)) \quad (6)$$

$$\frac{dC_w}{dt} = H_c \frac{M}{V_w} (C_g - S_g(T)) - B_w(T)X_w C_w \quad (7)$$

模型中,设 $S_g(T)$ 是随温度的升高而线性降低的参数,即

$$S_g(T) = S_{g,0} - S_g T \quad (8)$$

其中 $S_{g,0}$ 和 S_g 可以通过模型拟合而获得。

酶降解阿拉伯木聚糖的反应速率满足阿累尼乌斯(Arrhenius)方程

$$B_w(T) = B_{w,0} \times e^{-E_{kw}/RT} \quad (9)$$

在本模型中为了计算简便,减少估计参数的量,设 $B_w(T)$ 为一常数,有

$$B_w(T) = B_{w,0} \quad (10)$$

在糖化刚开始,设所有阿拉伯木聚糖都存在于谷物中,糖化醪中没有阿拉伯木聚糖。因此,初始条件满足以下方程

$$C_g(0) = C_{total} \quad (11)$$

$$C_w(0) = 0 \quad (12)$$

谷物中总阿拉伯木聚糖的含量(C_{total})通过实验测得,按照 Debyser 报道的分离和测定方法^[3]。

1.5 参数估计

模型参数估计就是通过模型拟合以减少预测值与真实值之间的误差,也就是找出参数向量 p 使误差的平方和最小。

$$\text{Minimum} \left\{ \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^2 (x_j^{(k)}(t_i) - x_j^{(k)}(t_i)) \times (x_j^{(k)}(t_i) - x_j^{(k)}(t_i))^T \right\} \quad (13)$$

$$x_j^{(k)}(t_i) = \{X_j^{(1)}(t_i), X_j^{(2)}(t_i)\} = \{C_w(t), X_w(t)\} \quad k = 1, 2 \quad (14)$$

$$P = \{P_1, P_2\} = \{H_x, K_{w,0}, E_{kx}, H_c, B_{w,0}, S_k, S_{g,0}\} \quad (15)$$

其中 N 代表用于参数估计过程中的总糖化次数, n_j 是从某糖化实验 j 的取样数目, $x_j^{(k)}(t_i)$ ($k = 1, 2$) 为实验测定值, $x_j^{(k)}(t_i)$ 为糖化实验预测值。

$P_1(H_x, K_{w,0}, E_{kx})$ 木聚糖酶溶解和失活的参数从等温糖化实验估计获得, $P_2(H_c, B_{w,0}, S_k, S_{g,0})$ 从溶解和降解阿拉伯木聚糖的参数结合等温糖化和升温糖化(曲线 7)获得。

实验模型的建立和预测在计算机上运用 Matlab 语言进行,计算方法采用最小二乘法和龙格-库塔法(ode45)^[11]。

2 结果

2.1 实验室规模糖化

2.1.1 不同温度曲线下的糖化 :本实验采用 Harrington 麦芽进行等温和升温糖化,以此一系列数据进行参数估计(表 2)。

表 2 Harrington 麦芽的估计参数和初始条件

Table 2 Initial condition for Harrington malt and identified model parameter values

Equation	X_0 (u/L)	H_x [L(g·min)]	$K_{w,0}$ (min ⁻¹)	E_{kx} (J/mol)	
(1-5)	119240	$2.01 \cdot 10^{-2}$	$2.98 \cdot 10^2$	277400	
Equation	C_{total} (g/L)	H_c [L(g·min)]	$B_{w,0}$ [L(u·min)]	S_g [g(L·K)]	$S_{g,0}$ (g/L)
(6-12)	68.4	$1.21 \cdot 10^{-5}$	$9.12 \cdot 10^{-7}$	$3.86 \cdot 10^{-2}$	65.2

图 2 为 Harrington 麦芽在不同升温糖化曲线(糖化曲线 2)下预测值与真实值的比较,真实值与预测值的误差为 +6.6%。此说明模型预测酶活和阿拉伯木聚糖的浓度值与实验测定值相差很小。实验室条件下,采用 Harrington 麦芽在不同糖化过程中预测值与实际测定值的相对误差在 -4.0% ~ 11.9%

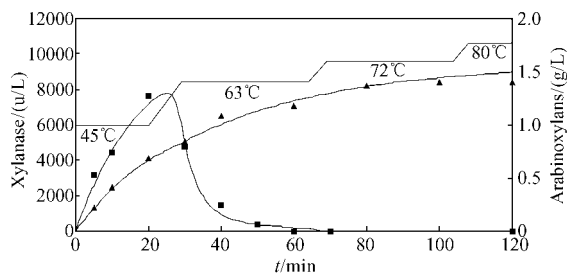


图2 糖化过程中(糖化曲线2)内切木聚糖酶活与阿拉伯木聚糖的浓度

Fig.2 Predicted (solid lines) and measured endo-xylanase activity (■) and arabinoxylans concentration (▲) in the water phase for Harrington malt (profile 2)

表3 模型预测值与实际测定值的相对误差

Table 3 The relative model prediction error between the measured and calculated values

Barley variety	Mashing programme	Arabinoxylans concentration		Error/%
		Calculated value(g/L)	Measured value(g/L)	
	Laboratory scale			
Harrington	Profile 1	1.321	1.365	-3.2
Harrington	Profile 2	1.495	1.402	+6.6
Harrington	Profile 3	1.536	1.470	+4.9
Harrington	Profile 4	1.338	1.394	-4.0
Harrington	Profile 5	1.411	1.352	+4.4
Harrington	Profile 6	1.480	1.321	+11.9
KA4B	Profile 1	1.280	1.362	-6.0
KA4B	Profile 2	1.377	1.212	+13.6
Kendall	Profile 1	0.952	1.052	-9.5
Kendall	Profile 3	1.060	1.151	-7.9
Schooner	Profile 1	1.152	1.221	-5.7
Schooner	Profile 5	1.259	1.192	+5.6
	Industrial scale			
Harrington	Profile A	1.011	0.841	+16.8
Schooner	Profile B	1.039	0.852	+17.9

2.1.2 不同麦芽的糖化:对 Schooner、Kendall 和 KA4B 三种麦芽同样进行模型拟合。模型参数采用 Harrington 的估计值(表2),而分别测定不同的初始条件。国产麦芽 KA4B 中的内切木聚糖酶活的初始值远低于 Harrington 麦芽的,因此在糖化过程中最高酶活只有 Harrington 麦芽的一半。此三种麦芽的估计参数和初始条件如表4所示,糖化过程中阿拉伯木聚糖浓度的预测值与实际测定值的相对误差在 -9.5% ~ 13.6%(表3)。

2.2 工业规模糖化

在三得利啤酒酿造公司和河南金星啤酒厂分别进行工业规模的模型验证,糖化曲线分别为 A 和 B (表1)。

图3是在河南金星啤酒厂以糖化曲线B进行的 Schooner 麦芽的65吨糖化实验。木聚糖酶活的预测曲线能较好地反映真实情况,而糖化麦汁中阿拉伯

表4 Schooner, Kendall, 和 KA4B 麦芽的估计参数和初始条件

Table 4 Initial condition for Schooner, Kendall, and KA4B malt and identified model parameter values

Barley variety	Xo(u/L)	C _{total} (g/L)	S _g [g·(L·K)]	S _{g,0} (g/L)
Schooner	104500	60.1	2.72·10 ⁻²	55.4
Kendall	82800	52.3	2.07·10 ⁻²	48.2
KA4B	65700	70.1	3.05·10 ⁻²	65.9

木聚糖的浓度与预测值的误差为 17.9%。

工业规模糖化所得阿拉伯木聚糖浓度的预测值与测定值之间的相对误差要高于实验室规模(-9.5% ~ 13.6%),对此产生的原因将在讨论处进行探讨。

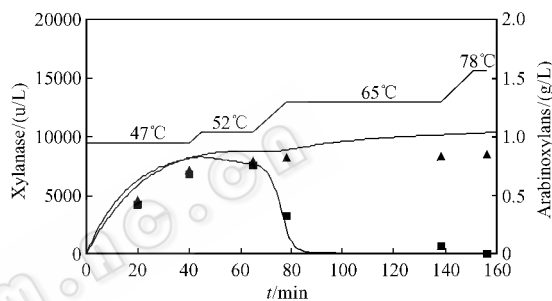


图3 工业糖化中(糖化曲线B)内切木聚糖酶活与阿拉伯木聚糖的浓度(Schooner 麦芽)

Fig.3 Predicted (solid lines) and measured endo-xylanase activity (■) and arabinoxylans concentration (▲) in the water phase in industrial experiment B

2.3 仿真结果

2.3.1 改变糖化初始温度和时间:图4表明,改变糖化曲线1的初始糖化温度,从45°C升到55°C,麦汁中阿拉伯木聚糖的浓度也逐渐增高。图5表明,改变糖化初始时间对麦汁中阿拉伯木聚糖含量的影响。在糖化曲线1下,将50°C保温时间改为0~45min,而保持总糖化时间为120min不变,麦汁中阿拉伯木聚糖的浓度从1.59g/L降到1.28g/L,降低了19.5%。

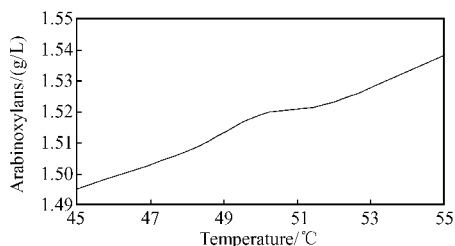


图4 改变糖化初始温度对麦汁中阿拉伯木聚糖浓度的影响
Fig.4 Predicted final arabinoxylans concentration in wort when step-wise changing mashing-in temperature (profile 1)

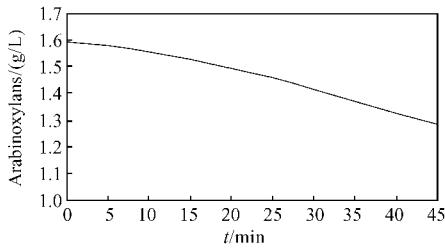


图5 改变糖化初始时间对麦汁中阿拉伯木聚糖浓度的影响

Fig.5 Predicted final arabinoxylans concentration in wort when step-wise changing mashing-in time (profile 1)

2.3.2 麦芽初始值的改变:在糖化曲线1条件下,将麦芽中内切木聚糖酶活提高或降低20%,糖化醪中最高酶活变化较大,但对麦汁中阿拉伯木聚糖浓度影响不大($\pm 3.6\%$) (图6),说明酶活高低对糖浓度没有显著的影响。

当麦芽中可溶性阿拉伯木聚糖增加或减少20%时,将显著影响麦汁中阿拉伯木聚糖的浓度($\pm 20\%$) (图7)。

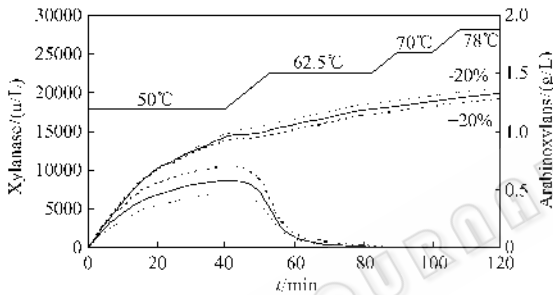


图6 预测模型中改变麦芽中内切木聚糖酶活($\pm 20\%$)对麦汁中阿拉伯木聚糖浓度的影响

Fig.6 Effects of $\pm 20\%$ changes in malt endo-xylanase activity on the predicted arabinoxylans concentration in the water phase

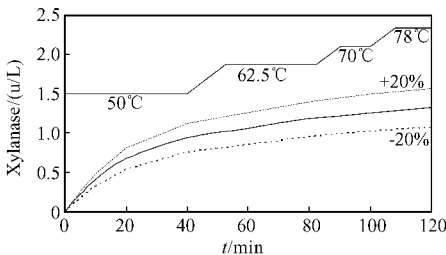


图7 预测模型中改变麦芽中可溶性阿拉伯木聚糖含量($\pm 20\%$)对麦汁中阿拉伯木聚糖浓度的影响

Fig.7 Effect of $\pm 20\%$ changes in malt soluble arabinoxylans concentration on the predicted arabinoxylans concentration in the water phase

2.3.3 糖化曲线的改变:将糖化曲线1的初始温度从50°C降低至45°C,初始糖化保温时间分别为30min和60min,而保持总糖化时间120min不变,得到两条糖化曲线(图8)。改变糖化曲线的结果表

明,糖化结束时,麦汁中的阿拉伯木聚糖分别降低了0.06g/L(4.8%)和0.24g/L(17.9%)。

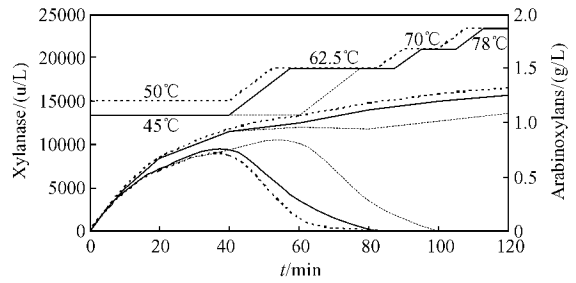


图8 预测模型中改变糖化曲线对内切木聚糖酶活和阿拉伯木聚糖浓度的影响

Fig.8 Predicted endo-xylanase activity and arabinoxylans concentration in the water phase for the changes of mashing profile

3 讨论

本实验建立了糖化过程中内切木聚糖酶的溶解和失活及阿拉伯木聚糖的溶解和降解的模型。实验室规模和工业规模的验证表明,此模型能较为准确地预测不同糖化过程下麦汁中阿拉伯木聚糖的浓度。工业生产下的预测值与真实值的误差要大于实验室条件下的误差,产生这种情况可能有以下几点原因:1. 将实验室条件下的估计参数应用于工业规模使误差放大;2. 工业规模的转化率与实验室规模有较大的差异;3. 在工业条件下重新进行参数估计将会降低实验误差。

仿真模型结果显示,改变初始糖化温度和时间能明显影响麦汁中阿拉伯木聚糖的浓度。在糖化曲线1下,将初始温度从55°C降至45°C,麦汁中阿拉伯木聚糖浓度能降低2.8%;而当初始糖化时间从0min增加到45min,麦汁中阿拉伯木聚糖浓度降低了19.5%。

图6和图7的结果表明,谷物中可溶性阿拉伯木聚糖的含量比谷物中内切木聚糖酶更能影响最终麦汁中的阿拉伯木聚糖的浓度,即麦汁中的阿拉伯木聚糖浓度主要决定于谷物中可溶性阿拉伯木聚糖的含量。

通过此模型的建立,能为工业生产较为准确地预测麦汁中阿拉伯木聚糖的含量,以防止过高的阿拉伯木聚糖含量影响啤酒酿造及成品啤酒质量。通过在计算机上运行Matlab程序,运用建立的模型,可以快速简便地对糖化过程中阿拉伯木聚糖的溶解和降解进行研究。

符号标注

$T(t)$	t 时刻的温度 (K)
$X_g(t)$	湿麦芽中内切木聚糖酶的活力 (u/L)
$X_w(t)$	糖化醪中内切木聚糖酶的活力 (u/L)
$C_g(t)$	湿麦芽中阿拉伯木聚糖的浓度 (g/L)
$C_w(t)$	糖化醪中阿拉伯木聚糖的浓度 (g/L)
C_{total}	谷物中阿拉伯木聚糖的浓度 (g/L)
K_{wD}	内切木聚糖酶的失活常数 (min^{-1})
E_{kx}	内切木聚糖酶的失活能 (J/mol)
H_x	内切木聚糖酶的溶解常数 (L/g·min)
B_{wD}	降解阿拉伯木聚糖的动力学常数 L($\text{u} \cdot \text{min}$)
E_{kc}	降解阿拉伯木聚糖所需能量 (J/mol)
H_c	可溶性阿拉伯木聚糖的溶解系数 L($\text{g} \cdot \text{min}$)
S_{gD}, S_g	湿麦芽中不溶性阿拉伯木聚糖浓度相关参数 [g/L, g(L·K)]
V_g	糖化醪中湿麦芽体积 (L)
V_w	糖化醪中液体体积 (L)
M	初始麦芽质量 (g)
R	气体常数 8.3143 J($\text{mol} \cdot \text{K}$)

REFERENCES (参考文献)

- [1] Henry RJ. Genetic and environmental variation in the pentosan and β -glucan contents of barley and their relation to malting quality. *J Cereal Sci*, 1986, **4**: 269 - 277
- [2] Voragen AG, Schols HA, Marius J, Rombouts FM, Angelino SAGF. Non-starch polysaccharides from barley: Structural features and breakdown during malting. *J Inst Brew*, 1987, **93**: 202 - 208
- [3] Debyser W, Derdelinckx G, Delcour JA. Arabinoxylan and arabinoxylan hydrolyzing activities in barley malt and worts derived from them. *J Cereal Sci*, 1997, **26**: 67 - 74
- [4] Vi tor RJ, Voragen AGJ, Angelino SAGF. Composition of non-starch polysaccharides in wort and spent grain from brewing trials with malt from a good malting quality barley and a feed barley. *J Inst Brew*, 1993, **99**: 243 - 248
- [5] Paul S, Paul BS, Richard DH. Effect of arabinoxylans, β -glucans, and dextrins on the viscosity and membrane filterability of a beer model solution. *J Am Soc Brew Chem*, 2002, **60**: 153 - 162
- [6] Li Y, Lu J, Gu GX, Shi ZP, Mao ZG. Studies on water-extractable arabinoxylans during malting and brewing. *Food Chem*, 2005, **93**: 33 - 38
- [7] Li Y, Lu J, Gu GX. Control of Arabinoxylans solubilization and hydrolysis in mashing. *Food Chem*, 2005, **90**: 101 - 108
- [8] Bailey MJ, Biely P, Poutanen K. Interlaboratory testing of methods for assay of xylanase activity. *Journal of Biotechnology*, 1992, **23**: 257 - 270
- [9] Schwarz PB, Han JY. Arabinoxylan content of commercial beers. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1995, **53**: 157 - 159
- [10] Marc A, Engasser JM, Moll M, Flayeux R. A kinetic model of starch hydrolysis by α - and β -amylase during mashing. *Biotechnology and Bioengineering*, 1983, **28**: 481 - 496
- [11] Rice RC. Split Runge-Kutta methods for simultaneous equations. *J Res Nat Bur Stand*, 1960, **64B**: 151 - 170

治理水华的微生物技术

水华 (water bloom) 指的是某些水域因受污染而产生富营养化 (eutrophication) 导致某些藻类如蓝藻等疯长的现象, 通常把这些水藻称之为水华。因它们大量繁殖, 会与其他水生动物争夺氧气, 会致使鱼类等因缺氧而窒息死亡, 因而尤遭渔民深恶痛绝。此外, 某些水华中的蓝藻还能分泌藻毒素, 不仅毒害水生生物, 甚至危害人类、牲畜。水体富营养化常含有硝酸盐、亚硝酸盐, 经加氯消毒后会形成多种致癌物质, 影响人体健康。在我国有些湖泊如太湖 (江苏)、滇池 (云南)、东湖 (湖北) 等以及云南的洱海等, 近几年都发生过水华现象, 其中有一种叫微囊藻的, 其产生的囊藻毒素, 其毒力仅次于二恶英。实验证明, 这类毒素不仅对生态环境造成危害, 而且对蓝藻爆发周边地区居民的身心健康也有很大的影响。已经发现, 这种毒素对人的肝脾等器官会有一定的损害, 癌症爆发的比例比没有受蓝藻污染地区的比例要大。

如何防治水华或控制这些水华之害呢? 微生物生物技术是清除水华的有效技术措施。从三方面考虑: 1) 某些细菌对一些赤潮藻细胞抑制生长, 甚至有裂解藻细胞之功效。我国厦门大学研究人员从海域沉积物中得到一种细菌叫 S10 菌株, 在 pH7 ~ 9 的海域中赤潮藻如塔玛亚历山大藻 (*Alexandrium tamaterse*) 的生长及产毒素能力有效被抑制, pH 值为 7 时, 抑制其产毒素的效果更好。俄罗斯列宁格勒大学 B. Gromov 教授发现了类似蛭弧菌功能的噬藻细菌, 这为研制菌剂治理水华提供了重要的信息。2) 某些真菌对水华中的蓝藻有裂解作用。如一种孢抱壳属的真菌, 据报道能裂解蓝藻, 这可能与产生头孢类菌素有密切关系, 通过其产生这种抗生素对这类蓝藻起杀灭作用。3) 藻病毒有可能成为治理水华的有效方法。如一种赤潮异弯藻病毒 (hetero-sigma akashiwo virus, HaV) D1 株, 能专一性感染这种赤潮藻, 有利于清除它, 其优点还有: 除专一性攻击靶目标水华之外, 其它浮游植物不受影响。这样, 有可能将其研制成“灭藻病毒制剂”, 由于该病毒复制速度快, 研制制剂费用相对较低, 可满足规模生产。但目前必须关注: 1) 这种病毒在自然条件下的侵染性、有效性和适应性如何? 2) 病毒的寄主藻群之中也存在着敏感群和抗性群, 后者则成为其专一性灭藻的障碍, 需要进一步探究。

因此, 用微生物-生物技术, 研发包括藻病毒制剂在内的微生物制剂, 来控制 and 根治水华的发生是完全有可能的, 但需要进一步的研究与实践。