

11株乳酸杆菌胆汁耐受性、耐酸性及降胆固醇能力研究

Study on bile tolerance, acid resistance and cholesterol lowering ability of 11 strains of *Lactobacillus*

王欢

WANG Huan

(广州城市职业学院食品系, 广东 广州 510405)

(Department of Food, Guangzhou City Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510405, China)

摘要:对11株乳酸杆菌的胆汁耐受性、耐酸性及降胆固醇能力进行了研究,探究了乳酸杆菌菌株去除胆固醇的机制。结果表明,所有乳酸杆菌菌株可在12.03~32.25 $\mu\text{g/mL}$ 的水平上同化胆固醇,其胆固醇去除能力与培养物的生长有关。热灭、休眠细胞清除的胆固醇干重为0.79~3.82 mg/g;生长细胞清除的胆固醇干重为4.53~16.03 mg/g,干酪乳杆菌 *L. casei* ASCC 292和嗜酸乳杆菌 *Lactobacillus acidophilus* 4962菌株表现出良好的耐酸性和耐胆汁性,说明乳酸杆菌菌株可以通过多种机制去除胆固醇,可作为降低血清胆固醇的膳食添加剂。

关键词:乳酸杆菌;胆汁耐受性;耐酸性;降胆固醇

Abstract: In this study, the biliary tolerance, acid resistance and cholesterol-lowering ability of 11 strains of *Lactobacillus* were studied, and the mechanism of removing cholesterol from *Lactobacillus* strains was explored. The cholesterol assimilation results determined by the difference in cholesterol content in the medium indicated that all *Lactobacillus* strains could assimilate cholesterol at a level of 12.03 to 32.25 $\mu\text{g/mL}$, and the cholesterol removal ability was related to the growth of the culture. The binding of cholesterol to lactobacilli cells was determined by growth, heat inactivation and dormant cells in phosphate buffer. The dry weight of cholesterol eliminated by heat and dormant cells was 0.79 to 3.82 mg/g; the dry weight of cholesterol cleared by growing cells was 4.53 to 16.03 mg/g. These results indicated that *L. casei* ASCC 292 and *L. acidophilus* 4962 strain exhibited good acid and biliary resistance, with the removal of most cholesterol from the medium. *Lactobacillus* strains could remove cholesterol by various mechanisms, and

could be used as a dietary supplement to lower serum cholesterol in the body.

Keywords: *Lactobacillus*; bile tolerance; acid resistance; cholesterol lowering

研究表明,血清胆固醇的升高与冠心病风险增加有关,每高于正常胆固醇水平1 mmol,冠心病的风险增加35%^[1],冠状动脉死亡风险增加45%;血清胆固醇降低1%^[2-3],冠心病风险将降低2%~3%^[4]。含有益生菌的乳制品可降低血清胆固醇水平,但其机制尚不明确^[5]。一些乳酸杆菌可降低总胆固醇、胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇^[6-7]。

嗜酸乳杆菌菌株可分泌胆盐(胆碱甘氨酸水解酶,酶代码 EC3.5.1.24),催化甘氨酸或牛磺酸结合胆盐水解为氨基酸残基和游离胆盐^[8],游离胆盐的可溶性低于结合胆盐,导致肠腔吸收率降低。胆汁酸的解聚可通过增加新的胆汁酸来降低血清胆甾醇—萜醇的水平^[9],这些新的胆汁酸取代了肠肝循环的胆汁酸。嗜酸乳杆菌在生长过程中可将培养基中的一些胆固醇合并到细胞膜中,被合并的胆固醇从肠道进入到血液中的可能性较小^[10],说明嗜酸乳杆菌细胞中的胆固醇可以改变机体的细胞膜或细胞壁。研究^[11-12]显示,只有一部分革兰氏阳性细胞在有胆固醇染色的情况下生长,而所有未经胆固醇染色的革兰氏阳性细胞都实现了生长。体外试验^[13-14]表明,能吸收胆固醇的乳酸杆菌菌株在体内也能降低胆固醇。胆固醇同化与胆汁盐的存在有关,并且随着胆汁盐浓度的增加,从培养基中去除的胆固醇水平增加。然而,嗜酸乳杆菌的耐胆汁菌株没有表现出良好的吸收胆固醇的能力;具有最小胆汁耐受性的菌株实际上吸收了更多的胆固醇。非发酵冷藏期间,嗜酸乳杆菌菌株的胆固醇摄取

作者简介:王欢(1979—),女,广州城市职业学院讲师,硕士。

E-mail: 541276072@qq.com

收稿日期:2020-02-07

与细菌的生长和生存能力有关,且其胆固醇同化能力依赖于生长^[15-17]。

试验拟对 11 株乳酸杆菌的抗菌特性(耐酸性和胆汁耐受性)进行研究,并分析其去除胆固醇的能力,以期对胆固醇去除的可能机制有所裨益,为开发能在体内降低血清胆固醇的膳食添加剂提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei*):生物实验室;

干酪乳杆菌 CSCC 2607 (*Lactobacillus casei* CSCC 2607):澳大利亚 Highett 公司;

干酪乳杆菌 ASCC 1520 (*L. casei* ASCC 1520)、干酪乳杆菌 ASCC 1521 (*L. casei* ASCC 1521)、干酪乳杆菌 ASCC 279 (*L. casei* ASCC 279)、干酪乳杆菌 ASCC 290 (*L. casei* ASCC 290)、干酪乳杆菌 ASCC 292 (*L. casei* ASCC 292)和干酪乳杆菌 ATCC 15820 (*L. casei* ATCC 15820):生物实验室发酵剂培养中心;

蛋白胨水稀释剂:上海江莱生物科技有限公司;

氢氧化钾、无水乙醇、邻苯二甲醛:分析纯,南京安伦化工科技有限公司;

厌氧罐:TU-190Z 型,美国 Sparks 公司;

气体生成试剂盒:英国 West Heidelberg 公司;

分光光度计:GN-12A 型,上海谷宁仪器有限公司;

离心机:L-8900 型,日立高新科技公司。

1.2 试验方法

1.2.1 培养方法 将培养物储存于-80℃,40%的甘油中。使用1%的接种物在无菌的 De-Man、Rogosa、Sharpe(MRS)肉汤中培养3次,并于37℃下培养20h。

1.2.2 耐酸性 11株嗜酸乳杆菌和干酪乳杆菌在试验前至少进行3次传代,最后一次传代后离心,按10%接种到含0.30%牛肝糖的MRS肉汤中,用盐酸将pH调至2.0,37℃下培养,并使用平板计数法^[18]进行生长监测。连续稀释前,对含有益生菌培养物的发酵液进行5s的超声波处理以破坏乳酸杆菌丛,连续稀释的空白组单独旋涡处理30s。每隔30min取1mL样品,持续2h,用蛋白胨水稀释剂连续稀释10倍。将样品电镀到MRS琼脂上,37℃,厌氧罐和气体生成试剂盒中培养24h,通过最终平板计数与初始平板计数确定耐酸性,所有试验重复两次。

1.2.3 胆汁耐受性 每种菌株接种含有质量分数0.30%的牛肝胆、胆酸或牛磺胆酸的MRS肉汤,并于37℃下培养,对照组为不含胆盐的MRS肉汤。使用分光光度计于620nm处测定培养7~8h的吸光度。每个菌株的胆汁耐受性基于吸光度值增加0.3个单位所需时间。测定所有发酵液的初始pH值,并在吸光度增加0.3个单位后再次测量。所有试验重复两次。

1.2.4 胆固醇去除 新制备的MRS肉汤添加0.30%的牛肝糖作为胆汁盐。将水溶性胆固醇(聚氧乙烷基胆固醇酯癸酸酯)过滤灭菌,以70~100μg/mL的最终浓度添加到肉汤中,按1%接种每种菌株,并于37℃下厌氧培养20h,离心细胞。向1mL等分试样中加入1mL33%的氢氧化钾和2mL无水乙醇,旋转1min,37℃下加热15min。冷却后,加入2mL脱分水和3mL己烷,将1mL己烷层转移到玻璃管中,氮气环境下蒸发,残渣立即溶解于2mL邻苯二甲醛试剂中,混合均匀后,添加0.5mL浓硫酸,并将混合物旋转1min。10min后测定550nm处吸光度。所有试验重复两次。

1.2.5 死细胞和静息细胞清除胆固醇能力 将新制备的含0.30%牛胆汁的MRS肉汤接种到每一株乳酸杆菌中,并于37℃下培养20h,4℃下离心10min,培育期后收获细胞。用无菌蒸馏水洗涤细胞两次。将细胞颗粒悬浮于10mL无菌蒸馏水中,121℃下蒸压15min制备热灭细胞^[19]。将热灭细胞悬浮于含0.30%的牛胆汁和水溶性胆固醇的MRS肉汤中。将细胞颗粒悬浮于10mL无菌0.05mol/L磷酸盐缓冲液(pH6.8,含有水溶性胆固醇)中制备静息细胞。所有菌株于37℃下培养20h,并测定肉汤中的胆固醇含量,所有试验重复两次。生长、静息和热灭细胞的胆固醇同化以干重的形式表达,并按式(1)进行计算^[20-21]。

$$S = (C_1 - C_2) / (W_2 - W_1), \quad (1)$$

式中:

S——胆固醇同化量;

C_1 、 C_2 ——发酵液中0,20h时的胆固醇含量,g;

W_1 、 W_2 ——个体培养物在0,20h时的干重,g。

1.2.6 统计分析 使用SPSS软件进行数据分析,采用单因素方差分析显著性。使用Tukey检验对平均值进行多次比较,结果以(平均值±标准误差)表示。

2 结果与讨论

2.1 耐酸性

由表1可知,所有菌株对pH2.0的耐受时间均为2h。嗜酸乳杆菌ATCC4962、干酪乳杆菌ASCC290和干酪乳杆菌ASCC292为最耐酸的菌株,在pH2.0下培养2h后,其耐酸性超过 10^7 CFU/mL;而干酪乳杆菌ASCC1520、干酪乳杆菌ASCC1521、干酪乳杆菌ASCC279、干酪乳杆菌ATCC15820和干酪乳杆菌CSC2607是酸敏感的菌株,培养2h后,其总耐酸性为 10^4 CFU/mL。嗜酸乳杆菌的菌落形成单位在培养的第1h减少了2.41~2.79个对数值,而干酪乳杆菌减少了1.58~2.26个对数值。嗜酸乳杆菌菌株在整个培养期间表现出更大的耐酸性,活菌数减少了2.66~4.38个对数值,而干酪乳杆菌的减少了3.16~6.20个对数值。干酪乳杆菌CSCC

2607 是最不耐酸性的菌株,培养期间,活菌数减少了 6.31 个对数值,其中培养的第 2 h 减少了4.20 个对数值。

2.2 胆汁耐受性

由表 2 可知,培养基 pH 值下降最大幅度出现在干酪乳杆菌 ASCC 290 和 CSCC 2607,添加了胆酸的培养基的初始 pH 值最低,但添加了牛胆汁的培养基的平均还原率最高,而最低的 pH 值来自于添加了牛磺胆酸的培养基(0.11)。说明不同胆汁来源培养基的初始酸碱度对培养物的后续生长和胆汁耐受性以及胆汁盐的酸碱抑制作用影响较小。多数嗜酸乳杆菌菌株在无胆汁的 MRS 肉汤中的生长均优于干酪乳杆菌株。嗜酸乳杆菌 ATCC 4356 在胆汁盐(牛胆汁和胆酸)和不含胆汁的情况下表现出相似的生长特性,而在含牛胆汁的 MRS 肉汤中,干酪乳杆菌 ASCC 290 的生长受到抑制(相较于对照组)。所有菌株在含有胆酸的 MRS 肉汤中生长速度更快;在含牛磺胆

酸的 MRS 肉汤中生长速度较慢。在胆酸存在下,干酪乳杆菌 ASCC 1520、干酪乳杆菌 ASCC 1521、干酪乳杆菌 ASCC 290、干酪乳杆菌 ATCC 15820 和嗜酸乳杆菌 ATCC 4357 对胆汁的耐受性最强,而嗜酸乳杆菌 ATCC 4356 和干酪乳杆菌 CSC 2607 的耐受性最低,大多数干酪乳杆菌菌株对胆酸的耐受性均优于嗜酸乳杆菌。牛磺胆酸存在下干酪乳杆菌的缓慢生长可能受其在 MRS 中缓慢生长的影响,而不是受结合胆汁的抑制作用^[24]。嗜酸乳杆菌 ATCC 33200、嗜酸乳杆菌 ATCC 4357、嗜酸乳杆菌 ATCC 4962 和干酪乳杆菌 ASCC 1521 对牛磺胆酸的耐受性最强,干酪乳杆菌 ASCC 279 的耐受性最低($P<0.05$)。干酪乳杆菌 ASCC 1520、干酪乳杆菌 ASCC 292、干酪乳杆菌 ATCC 15820 和嗜酸乳杆菌 ATCC 33200 的耐受性要优于干酪乳杆菌 ASCC 1521、干酪乳杆菌 ASCC 279 和干酪乳杆菌 ASCC 290。

表 1 嗜酸乳杆菌和干酪乳杆菌对活菌数的影响

Table 1 Viability of *Lactobacillus acidophilus* and *L. casei* (pH 2.0) lg CFU/mL

菌株	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min
<i>L.acidophilus</i> ATCC 33200	10.05±0.64	9.41±0.27	7.64±0.59	6.55±0.18	5.67±0.24
<i>L.acidophilus</i> ATCC 4356	10.13±0.58	8.27±0.75	7.60±0.03	6.73±0.32	5.77±0.17
<i>L.acidophilus</i> ATCC 4357	10.18±0.64	8.59±0.62	7.67±0.03	6.26±0.04	6.15±0.71
<i>L.acidophilus</i> ATCC 4962	10.21±0.09	8.11±0.33	7.42±0.13	6.27±0.10	7.55±0.20
<i>L.casei</i> ASCC 1520	10.41±0.86	9.41±0.27	8.29±0.06	6.49±0.38	4.51±0.14
<i>L.casei</i> ASCC 1521	10.56±0.60	9.10±0.63	8.30±0.02	6.37±0.08	4.70±0.08
<i>L.casei</i> ASCC 279	10.40±0.23	9.50±0.51	8.36±0.31	6.39±0.09	4.20±0.81
<i>L.casei</i> ASCC 290	10.65±0.31	10.20±0.88	9.07±0.86	8.68±0.21	7.00±0.71
<i>L.casei</i> ASCC 292	10.62±0.21	9.91±0.50	8.70±0.73	8.44±0.35	7.46±0.13
<i>L.casei</i> ATCC 15820	10.28±0.15	9.16±0.55	8.61±0.06	5.73±0.48	4.43±0.27
<i>L.casei</i> CSCC 2607	10.36±0.18	9.06±0.98	8.25±0.09	7.43±0.08	4.05±0.97

表 2 嗜酸乳杆菌和干酪乳杆菌的胆汁耐受性[†]

Table 2 Bile Tolerance of *Lactobacillus acidophilus* and *L. casei* in media min

菌株	肉汤			肉汤+0.3%牛胆汁			肉汤+0.3%胆酸			肉汤+0.3%牛磺胆酸		
	T	T ₁	T ₂	T	T ₁	T ₂	T	T ₁	T ₂	T	T ₁	T ₂
<i>L.acidophilus</i> ATCC 33200	3.53±0.13	6.09	5.95	3.29±0.18	6.13	5.98	3.08±0.14	5.84	5.61	4.03±0.19	6.05	5.89
<i>L.acidophilus</i> ATCC 4356	2.80±0.20	6.10	5.60	3.86±0.13	6.11	5.98	3.78±0.19	5.78	5.38	5.40±0.29	6.09	6.00
<i>L.acidophilus</i> ATCC 4357	3.04±0.21	6.08	5.80	3.92±0.40	6.11	5.57	2.65±0.25	5.88	5.53	4.40±0.26	6.05	6.01
<i>L.acidophilus</i> ATCC 4962	3.73±0.32	6.06	5.91	3.83±0.11	6.12	5.92	2.89±0.16	5.89	5.70	4.74±0.39	6.08	6.02
<i>L.casei</i> ASCC 1520	3.53±0.24	6.09	5.71	2.36±0.13	6.11	4.80	1.78±0.19	5.87	5.34	5.00±0.33	6.05	6.00
<i>L.casei</i> ASCC 1521	3.98±0.32	6.10	5.68	4.03±0.12	6.10	4.73	2.20±0.31	5.91	5.77	4.37±0.18	6.09	5.97
<i>L.casei</i> ASCC 279	5.30±0.13	6.07	5.93	4.24±0.28	6.12	5.98	3.19±0.35	5.86	5.70	6.21±0.21	6.08	6.00
<i>L.casei</i> ASCC 290	3.93±0.19	6.09	5.69	4.36±0.15	6.10	4.53	3.14±0.23	5.88	5.68	5.82±0.14	6.08	5.81
<i>L.casei</i> ASCC 292	3.95±0.13	6.09	5.80	3.17±0.12	6.10	5.99	2.04±0.16	5.90	5.45	5.52±0.12	6.07	6.01
<i>L.casei</i> ATCC 15820	4.62±0.41	6.08	5.61	3.21±0.28	6.09	4.25	2.22±0.36	5.84	5.53	5.19±0.33	6.06	5.95
<i>L.casei</i> CSCC 2607	5.01±0.25	6.06	5.71	3.88±0.19	6.12	4.52	3.82±0.33	5.80	5.47	5.64±0.39	6.09	5.97

[†] T 表示每种介质在 620 nm 处增加 0.3 个吸光度单位所需的时间;T₁、T₂ 分别表示初始时间及吸光度增加 0.3 单位的时间。

2.3 乳酸杆菌对胆固醇的同化作用

由表 3 可知,不同菌株的胆固醇去除能力不同($P < 0.05$),为 $3.76 \sim 34.69 \mu\text{g/mL}$ 。与对照组相比,干酪乳杆菌在胆酸存在下吸收了更多的胆固醇。在胆酸存在下,干酪乳杆菌的总胆固醇去除能力高于嗜酸乳杆菌的,干酪乳杆菌 ASCC 1520、干酪乳杆菌 ASCC 1521、干酪乳杆菌 ASCC 292、干酪乳杆菌 ATCC 15820 和嗜酸乳杆菌 ATCC 4962 吸收了 $25 \mu\text{g/mL}$ 以上的胆固醇,并优于嗜酸乳杆菌 ATCC 4356、嗜酸乳杆菌 ATCC 4357 和干酪乳杆菌 CSC 2607 吸收的胆固醇($\leq 15 \mu\text{g/mL}$)。在牛磺胆酸存在下,多数乳酸杆菌菌株的胆固醇含量较低(相较于对照组),嗜酸乳杆菌 *L.acidophilus* ATCC 33200 和干酪乳杆菌 *L.casei* ASCC 1521 的胆固醇去除能力最大($> 20 \mu\text{g/mL}$),但低于其胆汁盐。嗜酸乳杆菌的胆固醇去除能力明显高于干酪

乳杆菌的。在牛胆汁存在下,胆固醇去除能力为 $12.03 \sim 32.25 \mu\text{g/mL}$ 。除嗜酸乳杆菌 ATCC 4357、干酪乳杆菌 ASCC 279 和干酪乳杆菌 ASCC 290 菌外,大多数菌株的胆固醇去除能力高于对照组,而不同处理生物量水平可能对胆固醇浓度有影响^[15]。因此,后续进一步研究胆固醇同化模式及生长、热灭和休眠细胞去除胆固醇的能力。

由图 1、2 可知,除嗜酸乳杆菌 ATCC 4962、酪蛋白 1520 和酪蛋白 1521 外,大多数菌株在胆固醇存在的情况下表现出较高的生长速度,而在无胆固醇的情况下表现出较缓慢的生长速度。在不含胆固醇的情况下,大多数菌株在培养第 9~15 h 内生长较快,随后生长较慢直到培养结束;在胆固醇存在的情况下,大多数菌株在培养第 12~18 h 内生长缓慢,随后迅速生长。不同菌株的胆固醇同化模式不同,其去除胆固醇的能力与生长相关。

表 3 不同胆汁中乳酸杆菌的胆固醇去除能力

Table 3 Cholesterol assimilation level of *Lactobacillus* in different biles $\mu\text{g/mL}$

菌株	肉汤	肉汤+0.3%牛胆汁	肉汤+0.3%胆酸	肉汤+0.3%牛磺胆酸
<i>L.acidophilus</i> ATCC 33200	21.61±0.19	22.09±0.21	23.80±0.52	20.80±0.25
<i>L.acidophilus</i> ATCC 4356	20.52±0.46	21.78±0.23	14.01±0.14	9.07±0.30
<i>L.acidophilus</i> ATCC 4357	21.30±0.26	19.65±0.23	14.32±0.13	16.88±0.31
<i>L.acidophilus</i> ATCC 4962	19.22±0.47	23.40±0.39	27.60±0.25	14.69±0.25
<i>L.casei</i> ASCC 1520	20.68±0.21	32.25±0.42	34.69±0.45	8.86±0.27
<i>L.casei</i> ASCC 1521	18.02±0.44	18.71±0.40	29.64±0.35	20.32±0.31
<i>L.casei</i> ASCC 279	13.07±0.25	12.03±0.58	20.57±0.55	3.76±0.24
<i>L.casei</i> ASCC 290	18.75±0.46	12.66±0.42	23.02±0.64	6.93±0.26
<i>L.casei</i> ASCC 292	16.67±0.17	29.33±0.16	34.53±0.35	12.14±0.17
<i>L.casei</i> ATCC 15820	16.04±0.44	23.97±0.37	28.80±0.22	11.93±0.85
<i>L.casei</i> CSCC 2607	10.00±0.44	20.38±0.31	10.94±0.32	7.82±0.35

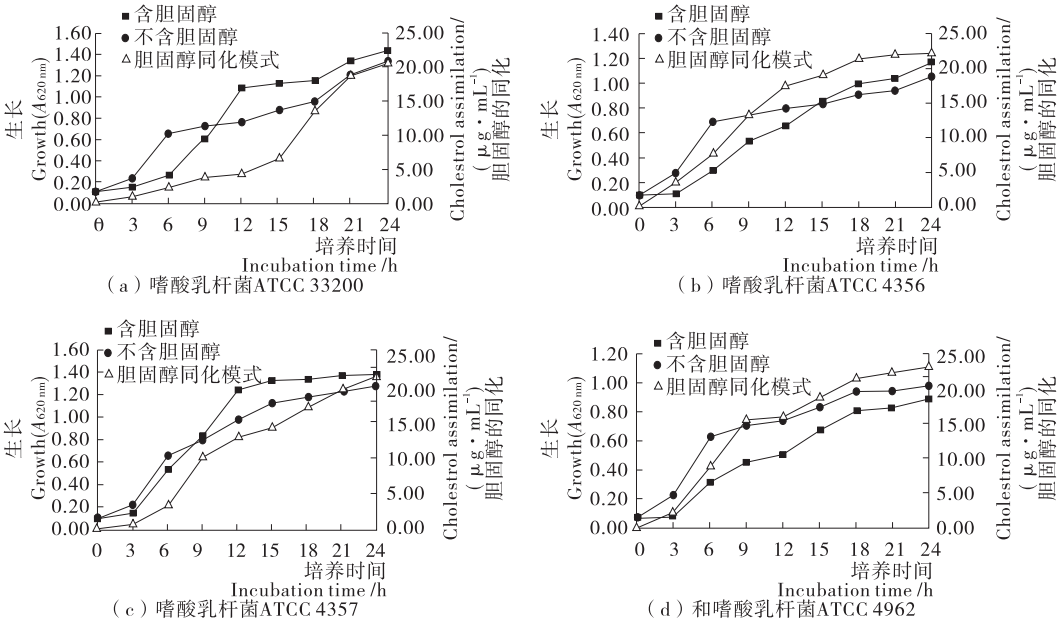


图 1 嗜酸乳杆菌在含/不含胆固醇的培养基中的生长概况

Figure 1 Growth and cholesterol assimilation patterns of *Lactobacillus acidophilus* in media with and without cholesterol

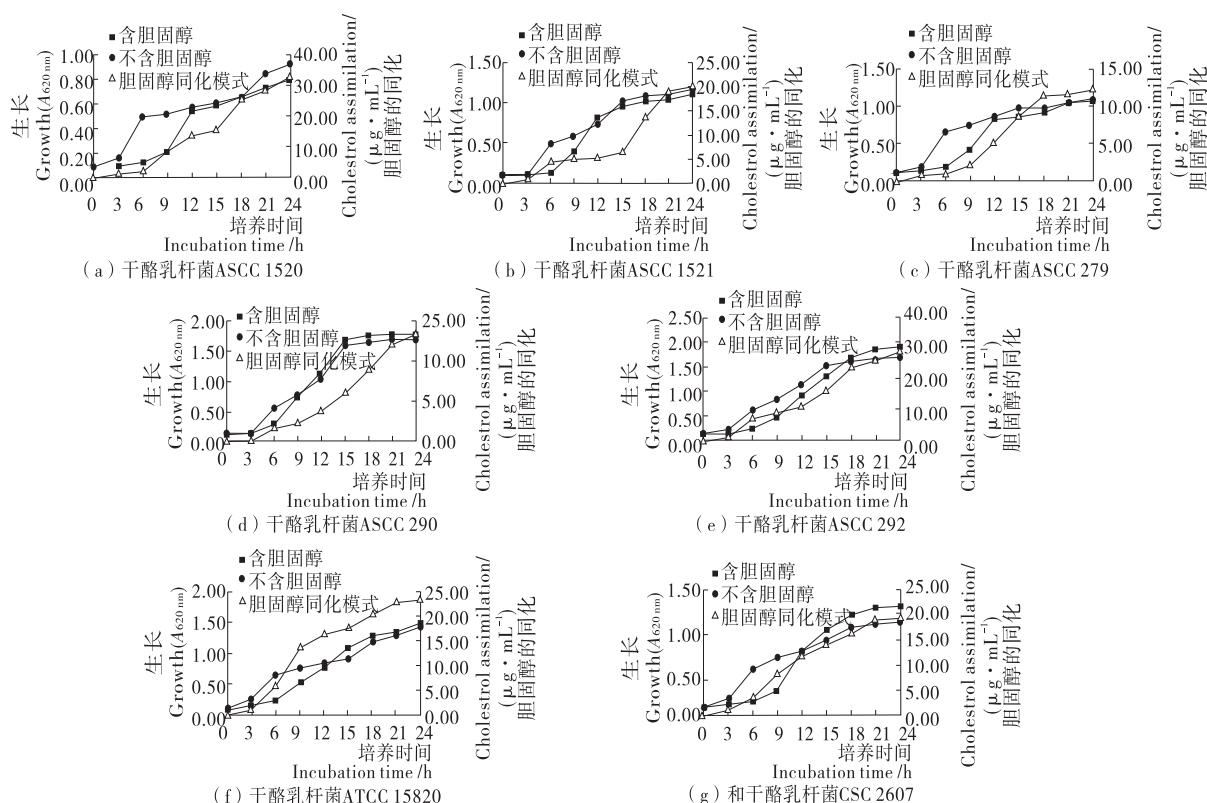


图2 干酪乳杆菌在含/不含胆固醇的培养基中的生长概况

Figure 2 Growths and cholesterol assimilation patterns of *Lactobacillus casei* in media with and without cholesterol

2.4 生长、热灭和休眠细胞的胆固醇去除能力

由图3可知,热灭细胞和静息细胞的胆固醇去除能力较小,为0.79~3.82 mg/g,而生长细胞的为4.53~16.03 mg/g。大多数菌株在细胞悬浮于磷酸盐缓冲液(pH 6.8)中时,其胆固醇去除能力高于热灭细胞的,且在细胞热灭时,干酪乳杆菌 ASCC 1520 的胆固醇去除能力高于静息细胞。这是由于干酪乳杆菌 ASCC 292、干酪乳杆菌 ATCC 15820 和干酪乳杆菌 ASCC 1520 在生长过程中吸收了更多的胆固醇,但在休息或热灭时不吸收。

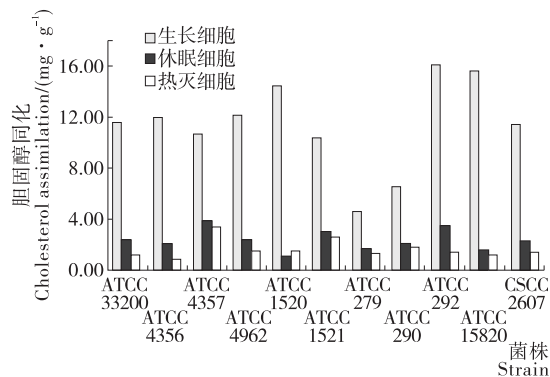


图3 生长、休眠和热灭细胞的胆固醇去除能力

Figure 3 Cholesterol removal by growing, resting, and heat-killed cells

嗜酸乳杆菌 ATCC 4357 和干酪乳杆菌 ASCC 1521 在生长过程中吸收的胆固醇较少,但在细胞静息和热灭时表现出相对较高的胆固醇去除能力;而干酪乳杆菌 ASCC 279 和干酪乳杆菌 ASCC 290 在生长过程中吸收了最低水平的胆固醇。

3 结论

对11株乳酸杆菌的胆汁耐受性、耐酸性和降胆固醇能力进行了研究。结果表明,所有乳酸杆菌菌株在不同的酸性条件和胆汁浓度下均能存活;所有乳酸杆菌菌株均能在12.03~32.25 $\mu\text{g/mL}$ 的水平同化胆固醇,且其去除能力与培养物的生长有关;热灭和休眠细胞清除胆固醇的能力为0.79~3.82 mg/g,生长细胞的为4.53~16.03 mg/g。综上,干酪乳杆菌 ASCC 292 和嗜酸乳杆菌 ATCC 4962 菌株表现出良好的耐酸性和耐胆汁性,且其胆固醇去除能力最强。研究进一步说明了乳酸杆菌菌株可通过多种机制去除胆固醇,可作为降低血清胆固醇的膳食添加剂应用于食品工业。后续将继续探究乳酸杆菌去除胆固醇的具体作用机理。

参考文献

[1] 黄燕燕, 郭均, 黎恒希, 等. 降胆固醇乳酸菌的体外筛选及

- 其降胆固醇机理探讨[J]. 食品科学, 2018(6): 88-94.
- [2] 李俊, 卢阳, 刘永翔, 等. 乳酸菌发酵对苦荞芽苗饮料品质和营养成分的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 201-205.
- [3] 吕丹丹, 何佳, 宋文华, 等. 8 种乳酸菌发酵对凤丹花瓣中酚类物质及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 146-151.
- [4] 韩墨, 王燕, 杨志鹏, 等. 内蒙古传统酸奶乳酸菌的筛选及体外益生效果评价[J]. 食品研究与开发, 2018(1): 152-156.
- [5] 刘绒梅, 田圆圆, 耿琦, 等. 四川稻城传统干酪中乳酸菌的分离鉴定及功能研究[J]. 中国测试, 2017(12): 58-62.
- [6] 苏爱美, 魏绍春. 胆道疾病患者胆汁菌群分布及耐药分析[J]. 中华实验和临床感染病杂志: 电子版, 2017, 11(6): 92-97.
- [7] 范颖, 陈思涵, 党芳芳, 等. 一株降胆固醇乳酸菌的筛选及其在模拟消化环境活性的研究[J]. 中国乳品工业, 2018, 46(9): 6-9.
- [8] 杨晓艳. 降胆固醇乳酸菌的筛选及其在低脂沙拉酱中的应用[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016: 45-61.
- [9] 陈珂可, 朱建国, 姜甜, 等. 具有降解胆固醇能力的益生菌菌株筛选[J]. 食品科技, 2018, 43(11): 12-16.
- [10] 李天艺, 李华, 焦文君, 等. 二甲双胍对老年 2 型糖尿病炎症和肠道菌群失衡的临床疗效研究[J]. 中华老年医学杂志, 2018, 37(8): 879-882.
- [11] 赵佳锐, 范晓兵, 杭晓敏, 等. 人体肠道益生菌体外降胆固醇活性研究[J]. 微生物学报, 2005, 45(6): 920-924.
- [12] 刘颖, 张洁, 高祀龙, 等. 酒精性肝病患者肠道中 6 种重要菌群的定量分析[J]. 营养学报, 2018(1): 36-41.
- [13] 章文明, 汪海峰, 刘建新. 乳酸杆菌益生作用机制的研究进展[J]. 动物营养学报, 2012, 24(3): 389-396.
- [14] 王越男, 孙天松. 代谢组学在乳酸菌发酵食品和功能食品中的应用[J]. 中国乳品工业, 2017(5): 27-31.
- [15] 李瑛. 浅析乳酸菌在食品工程中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2017(11): 40-41.
- [16] 王瑶, 韦云路, 李平兰. 乳酸菌食品级质粒及应用的研究进展[J]. 食品科学, 2017(13): 275-282.
- [17] 凌空, 翟磊, 姚粟, 等. 新疆传统发酵食品中乳酸菌的分离鉴定及其生长代谢特性[J]. 食品与发酵工业, 2017(3): 127-133.
- [18] 刘芸, 刘波, 邓元源, 等. 食品稳定剂在植物蛋白乳酸菌饮料生产中的应用研究进展[J]. 福建农业学报, 2017(9): 127-133.
- [19] 马国涵, 马欢欢, 吕欣然, 等. 大菱鲆肠道中广谱拮抗活性乳酸菌的筛选及其细菌素鉴定[J]. 食品科学, 2019(6): 159-165.
- [20] 孙思睿, 万峰, 贺菁, 等. 乳酸菌细菌素的抑菌活性测定及效价表示方法[J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 346-351.
- [21] 徐颖, 李洁, 贺丹丹, 等. 两株乳酸菌对铅的吸附作用[J]. 食品与机械, 2018, 34(3): 54-58.

(上接第 71 页)

$10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 冻融 2 次大果山楂在 65°C 下进行热风干燥时的有效扩散系数最大。此结果虽与冻融大果山楂热风干燥曲线的变化相一致, 但 65°C 是否为最优值, 还需进行优化研究才能确定。

3 结论

冻融预处理对大果山楂热风干燥特性影响明显。冻融预处理可缩短组织结构致密类物料干燥加工时间。

(1) 冻融大果山楂热风干燥过程存在 3 个阶段: 加速、恒速和降速干燥阶段, 随着冻融次数增加, 大果山楂热风干燥所需时间缩短。

(2) 不同干燥条件下的冻融大果山楂热风干燥过程符合 Logarithmic 方程。工业生产中可通过 Logarithmic 模型描述和预测冻融大果山楂热风干燥过程中水分含量随干燥时间的变化。

(3) 冻融次数和干燥温度影响大果山楂热风干燥时间和有效扩散系数, 大果山楂的有效扩散系数为 $1.08 \times 10^{-9} \sim 2.54 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 范围内。

参考文献

- [1] 郭婷, 白向丽, 陈益能, 等. 干燥方式对大果山楂粉干燥速率及品质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 122-125.
- [2] 黄欣欣. 大果山楂黄酮类物质的提取及其抗氧化性和降血脂功能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015: 1-3.
- [3] ANDO Y, MAEDA Y, MIZUTANI K, et al. Impact of blanching and freeze-thaw pretreatment on drying rate of carrot roots in relation to changes in cell membrane function and cell wall structure[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71: 40-46.
- [4] AN Ke-jing, LI Hui, ZHAO Dan-dan, et al. Effect of osmotic dehydration with pulsed vacuum on hot-air drying kinetics and quality attributes of Cherry Tomatoes[J]. Drying Technology, 2013, 31(6): 698-706.
- [5] 郭婷, 邓宏挺, 陈益能, 等. 冻融预处理对大果山楂热风干燥产品品质影响[J]. 食品工业, 2019, 40(11): 53-57.
- [6] 毕金峰, 芳芳, 丁媛媛, 等. 预处理对哈密瓜变温压差膨化干燥产品品质的影响[J]. 食品与机械, 2010, 26(2): 15-18.
- [7] 巨浩羽, 杨劲松, 赵海燕, 等. 真空-蒸汽脉动烫漂预处理对百合干燥特性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 207-210.
- [8] 张平, 郑志安, 江庆伍. 茯苓采后不同预处理方式对其品质及干燥特性的影响[J]. 食品工业, 2018, 34(20): 294-304.
- [9] 何新益, 郭婷, 邓放明, 等. 冻融处理对甘薯变温压差膨化干燥动力学的影响[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(5): 32-37.
- [10] RAMÍREZ C, TRONCOSO E, MUÑOZ J, et al. Microstructure analysis on pre-treated apple slices and its effect on water release during air drying[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(3): 253-261.
- [11] 刘艳, 段振华, 唐小闲, 等. 大果山楂片热风干燥特性及其动力学模型[J]. 食品工业, 2017, 38(3): 82-87.
- [12] 任茹娜, 巩桂芬. 山楂热风-微波联合干燥工艺优化及动力学模型[J]. 食品工业, 2018, 39(3): 8-13.