

月桂酸衍生物的合成与抑菌性的比较研究

梁准成¹, 杨继国¹, 刘冬蕻², 宁正祥¹

(1. 华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640) (2. 四川大学华西基础医学与法医学院, 四川成都 610041)

摘要: 本文进行了月桂酸衍生物(月桂酸单甘酯 GML、月桂酸双甘酯和三甘酯 GDL+GTL、聚甘油月桂酸单甘酯 PGML)合成的研究, 并比较了其抑菌活性和皮肤致敏性, 以获得应用性能更佳的月桂酸产品。采用固体酸性盐催化的酯化反应合成月桂酸衍生物, 优化的反应条件为: 催化剂 NaHSO₄ 用量为月桂酸重的 0.3%, 底物摩尔比为 1:2, 温度 200 °C、真空条件下反应 5 h; 反应产物采用分子蒸馏提纯, 得到的月桂酸单甘酯和聚甘油月桂酸单甘酯纯度较高。采用平板菌落计数法测定月桂酸衍生物的最低抑菌浓度, 结果表明: 月桂酸、GML 和 PGML 对革兰氏阳性菌和阴性菌均有较好的抑菌活性, 但在相同条件下月桂酸和 GML 的抑菌效果要优于 PGML, GDL+GTL 则无抑菌活性。通过皮肤致敏性测试, 证实月桂酸衍生物均不会导致人体皮肤过敏。

关键词: 月桂酸衍生物; 合成; 抑菌活性; 皮肤致敏性

文章编号: 1673-9078(2015)3-84-90

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.3.015

Synthesis and Antibacterial Activity of Lauric Acid Derivatives

LIANG Zhun-cheng¹, YANG Ji-guo¹, LIU Dong-qi², NING Zheng-xiang¹

(1. College of Light Industry and Food Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. College of Basic and Forensic Medicine, Sichuan University, Sichuan 610041, China)

Abstract: In this study, lauric acid derivatives including glycerol monolaurin (GML), mixture of glycerol dilaurin and glycerol trilaurin (GDL+GTL), as well as polyglycerol monolaurin (PGML) were synthesized and those with optimum application properties, in terms of antibacterial activity and skin sensitization reactions were identified. The esterification of lauric acid derivatives was carried out under the following optimal reaction conditions: NaHSO₄ at 0.3% of the weight of lauric acid, substrate molar ratio of 1:2, 200 °C and 5 h *in vacuo* with solid acid salt catalyst and the products were purified by molecular distillation. GML and PGML were obtained with relatively high purity. The minimum inhibitory concentration (MIC) was estimated by plate count method formed on the culture plate. The result showed that lauric acid, GML, and PGML showed high antibacterial activity towards both, gram-positive and gram-negative bacteria. The individual activities of lauric acid and GML were higher than that of PGML under the same conditions, while GDL+GTL combination showed no antibacterial activity. It was also confirmed via skin-sensitization tests that lauric derivatives did not induce skin allergy.

Key words: lauric acid derivatives; synthesis; antibacterial activity; skin sensitization

月桂酸单甘酯 (Glycerol Monolaurin, 简称GML, 分子式为C₁₅H₃₀O₄) 是美国密执安州立大学Kabara等人最早筛选出来的一种新型、安全、高效的抗菌剂, 同时也是一种优良的乳化剂。由于GML同时兼具良好的乳化性能和防腐性能, 因而被广泛应用于食品、化妆品、医药等行业当中。GML的抑菌效果比较稳定, 随pH值的变化而影响甚微, 同时它的抗菌谱广, 不但对食品中常见细菌^[1-3]、霉菌^[6]、酵母均有较强的抑制作用, 而且还具有抑制多种病毒和原生动物的功效。多年来

收稿日期: 2014-07-25

基金项目: 十二五科技支撑计划子课题 (No. 2012BAD33B11); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. 2014ZZ0063)

作者简介: 梁准成 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品科学

通讯作者: 杨继国 (1977-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为食品生物学

国内外学者对GML的抑菌特性做了大量研究, 结果表明其对常见腐败菌和致病菌 (如李斯特杆菌^[4-5]、霉菌^[6]、芽孢杆菌^[7-8]、分枝杆菌、螺旋杆菌等) 都具有较强的抑制作用, 且抑菌效果比一般防腐剂好。GML的合成方法包括直接酯化法、酶催化法、微波合成法等^[9], 其中直接酯化法操作简单, 设备廉价, 且可以用多种不同性质的催化剂进行催化合成, 成功率较高, 因此研究较为深入。单甘酯和聚甘油酯的合成通常是在充N₂或CO₂条件下, 以H₃PO₄、H₂SO₄或NaOH等液体酸碱作为催化剂进行合成的^[10-14]。本文尝试采用一种新的弱酸性盐固体催化剂NaHSO₄, 在真空条件0.1 MPa下对月桂酸衍生物进行合成, 并用分子蒸馏法分离提纯得到月桂酸单甘酯 (GML)、月桂酸双甘酯 (Glycerol dilaurin, 简称GDL) 与三甘酯 (Glycerol trilaurin, 简称GTL) 的混合物两种月桂酸衍生物。

由于月桂酸具有强烈的刺激性酸味,且水溶性差,不适宜作为食品添加剂使用。GML 虽然抑菌性好,但其外观为白色不透明固体,且稍微具有反应后残留的月桂酸刺激性气味,这使得 GML 在某些食品的使用(特别是在牛奶、饮料及含水量较高的液体食品)方面受到了一些限制。因此本文尝试以三聚甘油和月桂酸为原料进行酯化反应,获得另一种衍生物-聚甘油月桂酸单甘酯(Polyglycerol Monolaurin,简称聚甘油酯或 PGML),既能改变月桂酸和 GML 原有的外观状态和溶解性,去除刺激性的味道,又在一定程度上保留了 GML 的抑菌活性和乳化特性。目前国内关于聚甘油脂肪酸酯的研究大多数为聚甘油硬脂酸酯、聚甘油油酸酯和聚甘油癸酸酯^[15-17],而对聚甘油月桂酸酯的研究较少,本研究将为聚甘油月桂酸酯的合成与应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

月桂酸,天津市大茂化学试剂厂;硫酸氢钠,天津市福晨化学试剂厂;丙三醇、NaCl,国药集团化学试剂有限公司;三聚甘油(Polyglycerol-3),苏威(Solvay)(上海)有限公司;牛肉浸膏、细菌蛋白胨,广东环凯微生物科技有限公司;琼脂粉,北京奥博星生物技术有限责任公司;正己烷、异丙醇,永华化学科技(江苏)有限公司。

主要仪器:MD-S80型分子蒸馏装置,广州汉维冷气机电有限公司;Tensor红外光谱仪,德国burker公司;Agilent 1100 series 高效液相色谱仪;安捷伦科技公司;Agilent 6400 series 质谱仪;安捷伦科技公司。

金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*),枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*),乳酸菌(*Lactobacillus*),沙门氏菌(*Salmonella sp.*),大肠杆菌(*Escherichia coli*)。以上菌种均由华南理工大学生物科学与工程学院提供。

1.2 合成方法

1.2.1 月桂酸单甘油酯的合成

通过改变反应条件,分别探究合成的最适催化剂量、最适反应温度和最适反应时间。在酯化反应器中加入月桂酸和甘油,摩尔比为1:2,分别加入0.1%、0.3%和0.5%的硫酸氢钠作催化剂。反应器升温至140℃预热10 min,使月桂酸充分溶解为液体。打开磁力搅拌器,使两种原料充分混合,并将反应器升温至160℃、180℃和200℃,在0.1 MPa真空条件下进行反应。反应过程中每隔1h取样一次,测定产物的酸度,

待酸度降低到一定值后停止反应,静置5 min,待产物分层后趁热收取上层液体。

1.2.2 聚甘油月桂酸酯的合成

在酯化反应器中加入月桂酸和三聚甘油,摩尔比为1:2,同时加入0.3%的硫酸氢钠作催化剂。参照1.2.1的方法与结果,在200℃下进行聚甘油月桂酸酯的合成。

1.2.3 产物酸度检测

参照国家标准《GB/T5530-2005 动植物油脂酸值和酸度测定》,在反应过程中每隔1h取样进行酸度测定,得出酸度随反应时间的变化曲线,从而判断反应终点。酸度的表示公式为:

$$S' = V \times c \times \frac{M}{1000} \times \frac{100}{m} = \frac{V \times c \times M}{10 \times m}$$

其中S'-酸度,以质量分数表示,数值以%计;c-所用氢氧化钾标准溶液的浓度,单位为摩尔每升(mol/L);V-所用氢氧化钾标准溶液的体积,单位为毫升(mL);M-表示结果所用脂肪酸的摩尔质量,单位为克每摩尔(g/mol);m-试样的质量,单位为克(g)。

1.3 提纯方法

产物的提纯采用分子蒸馏法,先将产物中未反应的月桂酸分离出来,再进行单甘酯和聚甘油酯的蒸馏提纯。将月桂酸单甘油酯和聚甘油酯粗品分别倒入分子蒸馏装置中,在蒸馏温度100℃,冷凝面温度60℃,刮板转速250 r/min条件下蒸出残留的未反应原料,收集蒸余部分。单甘油酯在蒸馏温度120℃,冷凝面温度70℃条件下蒸馏,得到高纯度的GML和GDL+GTL混合物两种产物。聚甘油酯在蒸馏温度170℃,冷凝面温度75℃条件下蒸馏,得到高纯度的PGML产物。

1.4 检测方法

1.4.1 月桂酸单甘油酯的 HPLC 检测

色谱柱:Luna 5u Silica(2) 100A硅胶柱,250×4.60 mm;流动相:正己烷:异丙醇=10:1(V/V);流速1 mL/min;进样量:5 μL;柱温:35℃;检测器:示差折光检测器(RI)。

1.4.2 聚甘油月桂酸酯的 IR 及 MS 检测

红外光谱检测:用溴化钾压片法测定。

质谱检测:以少量甲醇为溶剂将样品溶解,利用高分辨质谱进行检测。质谱条件如下,离子源:电喷雾源(ESI);检测器:四级杆质量分析器;雾化器压力:0.3 bar;加热器温度:180℃;雾化气体流速:4 L/min。

1.5 抑菌活性

1.5.1 培养基配制

牛肉膏蛋白胨培养基: 牛肉膏3 g, 蛋白胨10 g, NaCl 5 g, 水1000 mL, pH 6.5~7。(若配制固体培养基则添加2%琼脂粉)

无菌生理盐水: NaCl 9 g, 水1000 mL。

1.5.2 菌种活化

将4 °C冰箱中保藏的菌种取出置于常温下解冻1 h。将5种细菌划线接种于牛肉膏蛋白胨固体斜面培养基上, 37 °C恒温培养24 h。

1.5.3 菌悬液制备

将活化后的细菌接种于200 mL的牛肉膏蛋白胨液体培养基中, 37 °C, 120 r/min恒温震荡培养24 h。

1.5.4 最低抑菌浓度(MIC)测定

将月桂酸、GML、GDL+GTL、PGML 4种药物分别加入培养基中, 配制成药物浓度为5.0 mg/mL、4.0 mg/mL、3.0 mg/mL、2.0 mg/mL、1.8 mg/mL、1.6 mg/mL、1.4 mg/mL、1.2 mg/mL、1.0 mg/mL、0.8 mg/mL、0.6 mg/mL、0.5 mg/mL、0.4 mg/mL、0.3 mg/mL、0.2 mg/mL和0.1 mg/mL的牛肉膏蛋白胨固体培养基。取1 mL菌悬液用无菌生理盐水稀释 10^5 倍, 吸取0.1 mL稀释液分别涂布到含各种浓度药物的牛肉膏蛋白胨平板中, 并以涂有相同浓度菌液的不含药物的普通培养基平板作为对照, 在37 °C下培养24 h, 用肉眼观察菌落形成情况, 无菌落形成的最低药物浓度即为各种药物的最低抑菌浓度。

1.6 皮肤致敏性测试

以食品防腐剂富马酸二甲酯(DMF)作为阳性对照, 将月桂酸及三种月桂酸衍生物和DMF用无水乙醇配成5g/L的溶液, 用棉签沾取适量溶液, 分别涂在10名健康试验者(5名男士和5名女士, 年龄在18~28岁之间)的手背上, 在涂抹后2 h内每隔30 min观察所涂部位发生的变化, 根据皮肤上有无红斑和水肿给测试药物进行打分, 并计算出致敏率。

2 结果与分析

2.1 不同条件下的反应情况

按方法1.2进行月桂酸衍生物的合成, 结果如图1~3所示。

酸度是监控反应进程的一个重要指标, 反应物的酸度主要是月桂酸的酸度。反应过程中酸度降得越低, 说明已反应的月桂酸越多, 生成的酯类产物也越多。当反应物酸度下降到5%以下时, 则认为95%的月桂酸已完全参与反应生成酯, 可结束反应, 收取产物。

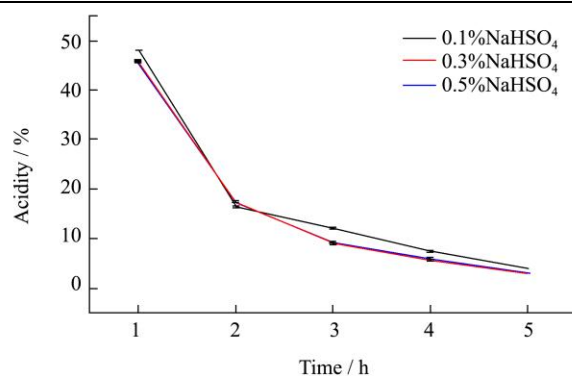


图1 180 °C下不同催化剂用量月桂酸单甘油酯酸度下降情况

Fig.1 Reduction of GML acidity at 180 °C using different amounts of catalyst

如图1所示, 在反应温度180 °C下, 催化剂用量为0.3% NaHSO₄和0.5% NaHSO₄时反应效率高于0.1% NaHSO₄, 且两者的酸度曲线几乎重叠, 酸度的最终值分别为2.97%和3.01%, 证明反应效率相当。从节省催化剂以及便于分离提纯的角度考虑, 确定反应最适催化剂用量为0.3%。

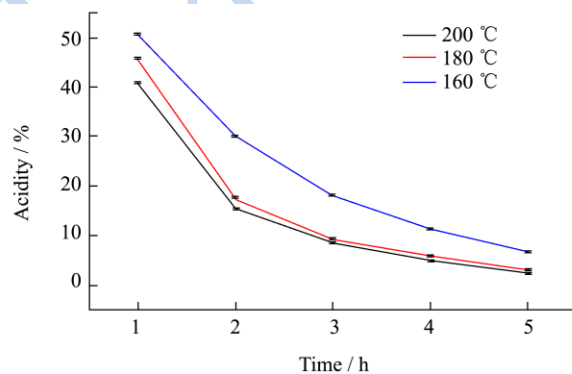


图2 不同反应温度下月桂酸单甘油酯酸度下降情况

Fig.2 Reduction of GML acidity at different temperatures

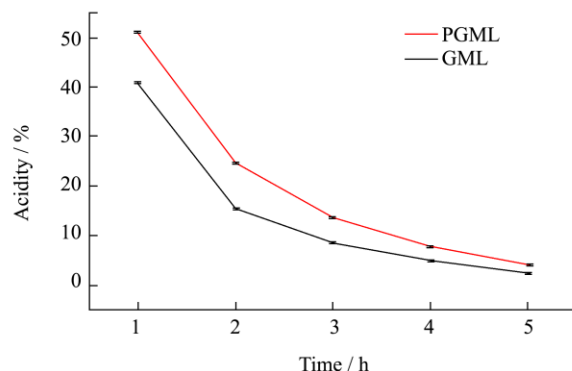


图3 月桂酸单甘油酯和聚甘油月桂酸酯酸度随反应时间的变化

Fig.3 Reduction in acidity of GML and PGML at different reaction time-periods

如图2所示, 月桂酸在180 °C和200 °C条件下的反应效率明显高于160 °C, 在200 °C下反应效率稍高于180 °C。180 °C下反应5 h后月桂酸酸度下降至2.97%,

而200 °C下经过相同的反应时间后月桂酸酸度下降至2.28%，说明在200 °C条件下月桂酸反应更加彻底。由于从180 °C上升至200 °C后酸度的最终值变化并不大，故无需再提高反应温度，确定月桂酸单甘油酯和聚甘油月桂酸酯的最适反应温度为200 °C。

如图3所示，无论是单甘油酯还是聚甘油酯的合成，反应产物的酸度都随反应时间的增加而逐渐降低。反应进行5h后月桂酸单甘油酯产物酸度下降至2.28%，聚甘油月桂酸酯产物酸度下降至4.13%。两者在反应5 h后酸度均降至5%以下，故确定5 h为最适反应时间。通过比较图3的两条曲线可知，在相同温度和反应时间下，聚甘油月桂酸酯的酸度比月桂酸单甘油酯高，原因可能是聚甘油月桂酸酯碳链更长，反应过程中形成的产物容易将少部分未反应的月桂酸原料包裹在其中，使其得不到充分反应，因而增加了产物的酸度。

2.2 产物感官对比

表1 月桂酸单甘油酯与聚甘油酯的感官对比

Table 1 Sensory comparison of GML and PGML

产物名称	月桂酸单甘油酯	聚甘油月桂酸酯
颜色	白色、不透明	淡黄色、透明
状态	固体，质地较软	粘稠状液体
气味	稍有残留的月桂酸味	有极淡的酯类香味
极性	小	大

如表1所示，用NaHSO₄催化合成的月桂酸单甘油酯与聚甘油月桂酸酯的颜色、状态、气味和极性方面都存在较大的差异：月桂酸单甘油酯为白色不透明固体，稍有月桂酸残留的刺激性味道，极性较小因而水溶性不如聚甘油酯好；聚甘油月桂酸酯为淡黄色、透明的粘稠状液体，没有残留的月桂酸味，且极性较大，易溶解在水中形成乳化体系，故从感官上比较，聚甘油月桂酸酯更适宜作为食品添加剂使用。

2.3 月桂酸单甘油酯检测结果

如图4所示，经分子蒸馏提纯后，轻相中的成分主要为GML，在HPLC检测中的保留时间为12~16 min，产物为1-月桂酸甘油酯和2-月桂酸甘油酯；重相中的成分主要为GDL和GTL的混合物，在HPLC检测中GTL的保留时间约为3 min，GDL的保留时间为4.2 min和4.9 min，产物分别为1,3-二月桂酸甘油酯和1,2-二月桂酸甘油酯。

2.4 聚甘油月桂酸酯检测结果

与月桂酸单甘油酯相比，聚甘油月桂酸酯因碳链

上含有较多羟基，极性发生较大变化，故不适合用反向高效液相色谱法进行检测，需要用红外光谱法和质谱法对其进行测定。

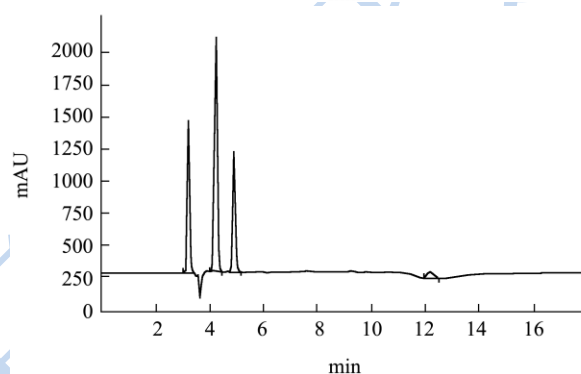
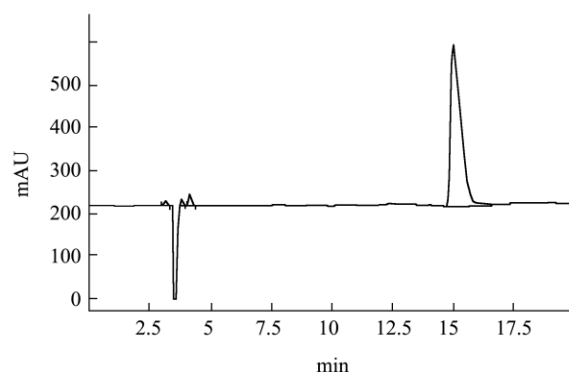


图4 月桂酸单甘油酯 HPLC 图

Fig.4 HPLC spectrum of GML

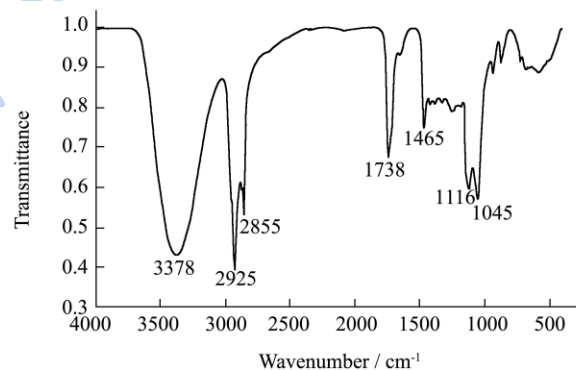


图5 PGML 红外光谱图

Fig.5 IR spectrum of PGML

对PGML进行分子蒸馏提纯后用红外光谱溴化钾压片法测定，如图5所示，其主要数据为：3378 cm⁻¹宽吸收峰为碳链上OH的吸收峰；2925 cm⁻¹为CH₂不对称伸缩振动，2855 cm⁻¹为CH₂对称伸缩振动，1738 cm⁻¹为饱和脂肪酸酯键上C=O的吸收峰，1465 cm⁻¹为C-H弯曲振动，1116 cm⁻¹为C-O-C不对称伸缩振动，1045 cm⁻¹为C-O-C对称伸缩振动。由红外光谱的主要数据可以初步确定产物为月桂酸三聚甘油酯。

2.5 质谱检测结果

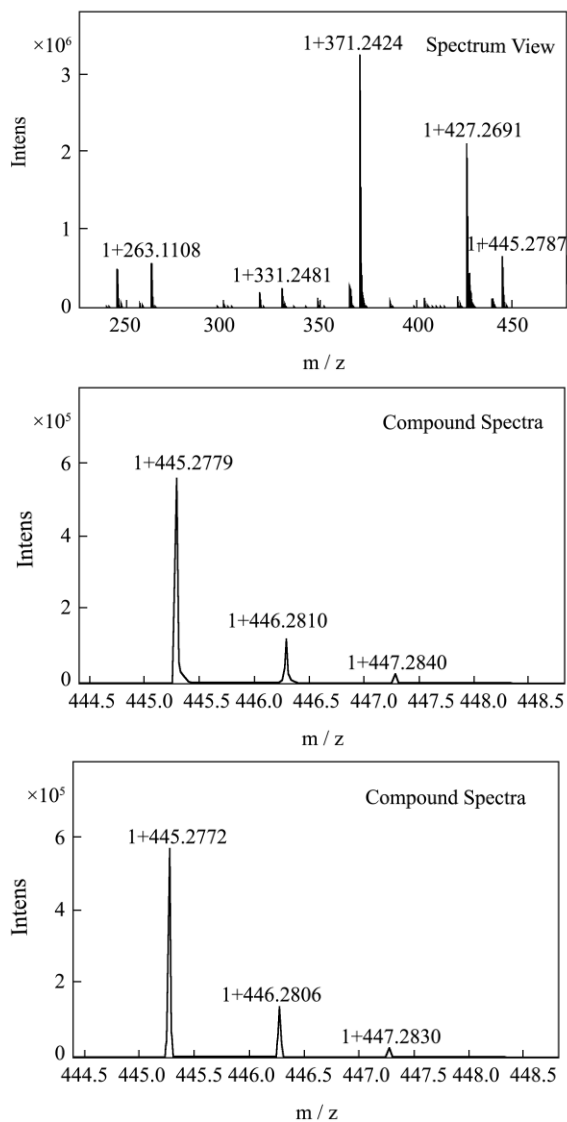


图6 PGML 质谱检测

Fig.6 MS spectrum of PGML

如图6所示, Mr=445.2787为产物PGML+Na⁺的质

表2 月桂酸及其衍生物对细菌的最低抑菌浓度(MIC)

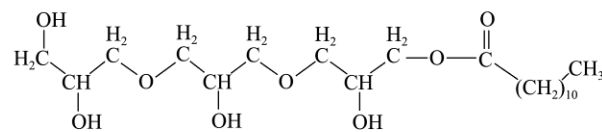
Table 2 Minimal inhibitory concentration (MIC) of lauric acid and its derivatives against bacteria

抗菌剂种类	最低抑菌浓度(MIC)/(mg/mL)				
	<i>B. subtilis</i>	<i>S. aureus</i>	<i>Lactobacillus</i>	<i>E. coli</i>	<i>S. sp.</i>
月桂酸	0.4	0.3	0.4	0.8	0.8
月桂酸单甘酯(GML)	0.4	0.3	0.4	0.8	0.8
月桂酸双甘酯与三甘酯(GDL+GTL)	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0
聚甘油月桂酸酯(PGML)	1.0	1.0	1.0	1.8	1.8

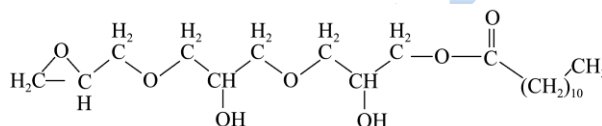
注: *Bacillus subtilis*-枯草杆菌; *Staphylococcus aureus*-金黄色葡萄球菌; *Lactobacillus*-乳酸菌; *Escherichia coli*-大肠杆菌; *Salmonella Sp.*-沙门氏菌。

如表2所示, 月桂酸、GML和PGML三种物质对革兰氏阳性细菌和革兰氏阴性细菌均有抑制效果, 其中对枯草杆菌、金黄色葡萄球菌和乳酸菌等革兰氏阳性菌的抑菌效果要优于大肠杆菌、沙门氏菌等革兰氏阴性菌。已有研究表明月桂酸及其衍生物的抑菌机理是

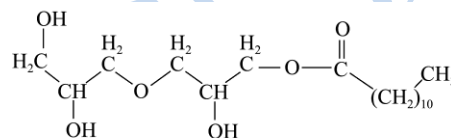
谱峰, 丰度为20.5%, 结构式为:



Mr=427.2691为产物PGML+Na⁺脱水后的质谱峰, 丰度为93.4%, 结构式为:



Mr=371.2424为产物PGML+Na⁺脱去一个甘油分子后的质谱峰, 丰度为100%, 结构式为:



从中提取出Mr=445.2279特征离子碎片与标准数据库作比较模拟, 样品具有Mr=445.2779, 446.2810, 447.2840三个同位素峰, 标准数据库模拟图谱中具有Mr=445.2772, 446.2806, 447.2830三个同位素峰, 峰形、丰度及出峰时间均相似。故可确定所测聚甘油酯样品为月桂酸三聚甘油酯, 且从分析可知月桂酸三聚甘油酯进行高分辨质谱检测时, 离酯键最远端的两个游离羟基容易发生脱水形成环化结构, 离酯键最远端的一个甘油分子容易因醚键断裂而脱去, 形成月桂酸二聚甘油酯。

2.6 月桂酸衍生物的抑菌活性实验

与脂溶性的细胞膜作用, 穿透细胞膜后使细菌DNA、蛋白质等内容物外流^[18-19]。革兰氏阳性菌的细胞壁主要由肽聚糖和磷壁酸组成, 组分比较简单, 抑菌药物容易穿过细胞壁并与细胞膜结合; 革兰氏阴性菌的细胞壁主要由薄肽聚糖层、脂蛋白层、磷脂层和脂多糖层

组成, 组分比较复杂, 抑菌药物不容易穿过细胞壁。在月桂酸及其衍生物中, 月桂酸和GML的抑菌效果相当, PGML也具有一定的抑菌活性, 但其效果不如月桂酸和GML好, GDL+GTL混合物具有脂溶性但在同一浓

度水平上不具有抑菌活性, 具体原因有待进一步研究。

2.6 皮肤过敏性测试结果

表3 月桂酸及其衍生物的皮肤致敏性测试

	0 min	30 min	60 min	90 min	120 min	致敏率/%
月桂酸	0	0	0	0	0	0
月桂酸单甘酯(GML)	0	0	0	0	0	0
月桂酸双甘酯与三甘酯(GDL+GTL)	0	0	0	0	0	0
聚甘油月桂酸酯(PGML)	0	0	0	0	0	0
富马酸二甲酯(DMF)	0	4	6	5	5	100

注: (1)皮肤过敏性反应评分标准: ①红斑: 无红斑, 0分; 勉强可见, 1分; 明显可见, 2分; 中度到严重红斑, 3分; 紫红色红斑并有焦痂形成, 4分; ②水肿: 无水肿, 0分; 勉强可见, 1分; 可见(边缘高出周围皮肤), 2分; 皮肤隆起约1 mm, 轮廓清楚, 3分; 皮肤隆起约1 mm以上且范围扩大, 4分。最高总分为8分。(2)致敏率=出现症状/参加试验总人数×100%。

由于部分酯类防腐剂在食品中应用时, 会刺激人体皮肤产生过敏反应和皮肤炎症, 故对所合成的月桂酸酯类衍生物进行皮肤过敏测试。结果如表3所示, 阳性对照富马酸二甲酯在实验进行30 min后, 试验者皮肤出现了过敏现象, 且致敏率为100%。而月桂酸及其衍生物对皮肤均无致敏性, 对人体较为安全。

3 结论

3.1 本文以硫酸氢钠为催化剂, 在真空条件下成功合成月桂酸酯类衍生物, 优化的合成条件为: 反应温度200 °C, 酯化时间5 h, 酸醇比为1:2, 催化剂用量0.3%, 所获得的月桂酸单甘油酯为白色稍有气味的固体, 聚甘油月桂酸酯为淡黄色稍有酯类香味的粘稠状液体。产物通过分子蒸馏法进行提纯后, 用HPLC法对月桂酸单甘油酯进行检测, 用IR和MS法对聚甘油月桂酸酯进行结构鉴定, 结果表明, 经过分子蒸馏后可得到纯度较高的GML、GDL+GTL混合物和PGML三种月桂酸衍生物。

3.2 通过最低抑菌浓度实验研究了月桂酸衍生物对枯草杆菌、金黄色葡萄球菌、乳酸菌、大肠杆菌和沙门氏菌5种细菌的抑菌活性, 结果表明月桂酸、GML和PGML对革兰氏阳性菌和阴性菌均有一定的抑制作用, 其中月桂酸与GML的抑菌效果最好, PGML也具有一定的抑菌活性, 三种物质对革兰氏阳性菌的抑菌效果均优于阴性菌, 但GDL+GTL则不具有抑菌活性。另外经简单的皮肤致敏性测试, 证明月桂酸及其衍生物对人体皮肤均无致敏性。

参考文献

[1] Jill K Branen, P Michael Davidson. Enhancement of nisin,

lysozyme, and monolaurin antimicrobial activities by ethylene diamine tetraacetic acid and lactoferrin [J]. International Journal of Food Microbiology, 2004, 90(1): 63-74

[2] Ta-Naska Trotter, Douglas L Marshall. Influence of pH and NaCl on monolaurin inactivation of *Streptococcus iniae* [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 20(2): 187-192

[3] Fenja Klevenhusen, Leo Meile, Michael Kreuzer, et al. Effects of monolaurin on ruminal methanogens and selected bacterial species from cattle, as determined with the rumen simulation technique [J]. Anaerobe, 2011, 17(5): 232-238

[4] Els G A Verhaegh, Douglas L Marshall, Deog-Hwan Oh. Effect of monolaurin and lactic acid on *Listeria monocytogenes* attached to catfish fillets [J]. International Journal of Food Microbiology, 1996, 29(2): 403-410

[5] Maria Blaszyk, Richard A. Holley. Interaction of monolaurin, eugenol and sodium citrate on growth of common meat spoilage and pathogenic organisms [J]. International Journal of Food Microbiology, 1998, 39(3): 175-183

[6] Chunyan Luo, Zeling Zeng, Deming Gong et al. Evaluation of monolaurin from camphor tree seeds for controlling food spoilage fungi [J]. Food Control, 2014, 46: 488-494

[7] Marianne Mansour, Jean-Bernard Milliere. An inhibitory synergistic effect of a nisin-monolaurin combination on *Bacillus sp.* vegetative cells in milk [J]. International Journal of Food Microbiology, 2001, 18(1): 87-94

[8] Lori N Cotton, Douglas L Marshall. Monolaurin preparation method affects activity against vegetative cells of *Bacillus cereus* [J]. LWT-Food Science and Technology, 1997, 30(8): 830-833

- [9] 刘燕. 中碳链脂肪酸甘油酯的制备及乳化和抑菌性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011
LIU Yan. Research on the synthesis of medium chain monoglyceride and its emulsifying and antibacterial activity [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011
- [10] 曾哲灵, 邹强, 聂蓉蓉, 等. 固体碱催化合成中碳链脂肪酸聚甘油酯[J]. 中国油脂, 2012, 37(5): 39-43
ZENG Zhe-ling, ZOU Qiang, NIE Rong-rong, et al. Synthesis of polyglycerol medium chain fatty acid ester catalyzed by solid base catalyst [J]. China Oils and Fats, 2012, 37(5): 39-43
- [11] 聂蓉蓉. 中碳链脂肪酸甘油酯的制备[D]. 南昌: 南昌大学, 2011
NIE Rong-rong. Prepare for polyglycerol middle carbon chain fatty acid ester [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011
- [12] 邹强. 中碳链脂肪酸三聚甘油酯绿色合成及乳化性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012
ZOU Qiang. Research on green synthesis and emulsifying properties of the tripolyglycerol medium chain fatty acid ester [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012
- [13] 游利琴, 肖咏梅, 张风雷. 月桂酸单甘酯的催化合成[J]. 广东化工, 2011, 38(9): 273-274
YOU Li-qin, XIAO Yong-mei, ZHANG Feng-lei. Catalytic synthesis of glycerol monolaurate [J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(9): 273-274
- [14] 黄芳, 刘波. 月桂酸单甘酯的合成研究[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2007, 14(2): 122-124
HUANG Fang, LIU Bo. Research on synthesis of glycerol monolaurate [J]. Journal of Liaodong University (Natural Sciences), 2007, 14(2): 122-124
- [15] 聂凌鸿. 聚甘油脂肪酸酯合成与应用[J]. 粮食与油脂, 2003, 1: 45-46
NIE Ling-hong. Synthesis and application of polyglyceryl fatty acid esters [J]. Cereals and Oils, 2003, 1: 45-46
- [16] 肖凯军, 郭丹丹, 刘晓红. 聚甘油酯合成及特性研究[J]. 现代食品科技, 2008, 24(10): 966-968
XIAO Kai-jun, GUO Dan-dan, LIU Xiao-hong. Synthesis and property of polyglycerol ester [J]. Modern Food Science and Technology, 2008, 24(10): 966-968
- [17] 周立国, 张剑文, 谭琛. 各种聚甘油酯在保湿护肤化妆品中的应用研究[J]. 山东轻工业学院学报, 2009, 23(4): 66-69
ZHOU Li-guo, ZHANG Jian-wen, TAN Chen. Various application study on polyglycerol ester in keeping moisture of skin cosmetics [J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry, 2009, 23(4): 66-69
- [18] 赵存洋. 单月桂酸甘油酯的抑菌性能及机理研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013
ZHAO Cun-yang. Study on antibacterial properties of monolaurin and its mechanism [D]. Nanchang: Nanchang University, 2013
- [19] 周星. 中碳链脂肪酸聚甘油酯的制备和性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012
ZHOU Xing. Study on preparation and properties of polyglycerol medium-chain fatty acid esters [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012
- [20] 刘倩, 韦庆益, 刘丽萍, 等. 富马酸单苯甲酯的合成及抗菌特性研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(4): 387-390
LIU Qian, WEI Qing-yi, LIU Li-ping, et al. Synthesis and antimicrobial activity of monobenzyl fumarate [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(4): 387-390