

不同脂肪酸组成及发酵处理的植物油脂对痤疮丙酸杆菌增殖作用的研究

陈忆^{*}, 林琳, 徐思伟, 王蕊蕊

(上海科黛生物科技有限公司(毕生之研实验室), 上海, 201703)

DOI:10.61369/CDCST.2026010003

摘要:探讨了不同植物油脂及其发酵产物对痤疮丙酸杆菌(*Cutibacterium acnes*)增殖的影响。通过测定1%、3%、5%体积分数下各类油脂处理的菌落生长情况发现:富含Omega-3的紫苏籽油和奇亚籽油在低浓度促进细菌生长,但高浓度(5%)时表现出抑菌作用,可能与α-亚麻酸破坏细菌膜结构、诱导氧化应激有关。富含Omega-6的葡萄籽油无显著抑菌效果,而红花油在3%~5%浓度下抑制细菌增殖,推测与其含共轭亚油酸干扰群体感应有关。高Omega-9油脂(山茶油、橄榄油等)随浓度升高持续促进细菌生长,因其可作为碳源被利用。特别地,经米曲霉脂肪酶发酵后,含57%甘油单酯的海甘蓝籽油在低浓度促进细菌生长,高浓度则形成胶束抑制生长,而仅含29%甘油单酯的发酵紫苏籽油影响不显著。研究结果为植物油脂在抗痤疮产品中的应用提供了理论依据,表明高浓度Omega-3油脂及特定发酵油脂可能具有抑菌潜力。

关键词:痤疮丙酸杆菌; 奇亚籽油; 紫苏籽油; 发酵油脂; 增殖作用

作者简介:陈忆,现就职于上海科黛生物科技有限公司毕生之研实验室,从事微生物和生物发酵研发工作。E-mail: yi.chen@corday.tech。



陈忆

痤疮丙酸杆菌(*Cutibacterium acnes*)是痤疮(痘痘)发病的核心因素之一,而油性皮肤(皮脂分泌旺盛)为其提供了理想的生存环境。痤疮丙酸杆菌是一种厌氧菌,依赖皮脂(甘油三酯)作为主要营养来源^[1,2]。油性皮肤的皮脂腺过度活跃,分泌大量油脂,形成毛囊内缺氧环境,促进该菌增殖。该菌代谢皮脂产生游离脂肪酸和丙酸,进一步刺激毛囊角化异常和炎症反应^[3,4]。并且,痤疮丙酸杆菌激活免疫系统,释放促炎因子(如IL-1 α 、TNF- α),导致红肿、脓疱等炎性痤疮^[5,6]。在日常护理中,过度清洁或不当护肤会破坏皮肤屏障,导致经皮水分流失(TEWL),刺激皮脂腺代偿性分泌更多油脂,屏障受损后,细菌更容易侵入毛囊深层,加重感染^[7,8]。护肤品中的植物油富含各种脂肪酸,这些脂肪酸对皮肤屏障的形成和维持至关重要,能够防止水分流失和抵御外界侵害,例如山茶油、橄榄油、葡萄籽油、紫苏籽油等通常为甘油三酯,然而甘油三酯的结构不同^[9]。山茶中Omega-9(油酸)含量最高,占总脂肪酸的78.05%,而Omega-3(α-亚麻酸)和Omega-6(亚油酸)含量相对较低^[10]。葡萄籽油中亚油酸(70.10%~71.55%)、油酸(15.33%~17.28%)和棕榈酸(6.84%~8.18%)是油中主要的脂肪酸^[11]。为了探究护肤品中不同脂肪酸种类对油性肌肤的影响,通过体外痤疮丙酸杆菌增殖实验,观察各脂肪酸对痤疮丙酸杆菌增殖的影响。该研究对于植物油应用到日化领域,特别是作用于皮

肤,有一定的参考价值。

1. 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂:痤疮丙酸杆菌ATCC11827, American Type Culture Collection; 胰蛋白胨大豆肉汤(TSB), CM0129, 英国Oxoid; 生理盐水, S7653, Sigma-Aldrich; 琼脂粉(TSA用), A1296, Sigma-Aldrich; 血球计数板(规格:25x16), 上海卓冀生物技术有限公司; 紫苏籽油、葡萄籽油、精炼奇亚籽油、山茶油、橄榄油、海甘蓝籽油、红花油、高油酸葵花籽油, 上海科黛生物科技有限公司; 发酵紫苏籽油、发酵海甘蓝籽油, 自制。

仪器:MLS-3780型高压灭菌锅,日本Panasonic; DG250型厌氧培养箱,英国Don Whitley; ISF1-X型恒温摇床,瑞士Kühner; SW-CJ-2FD型超净工作台,苏净安泰; ME204E型电子天平,瑞士Mettler Toledo; FiveEasy Plus型pH计,瑞士Mettler Toledo; LDZF-50L-I型立式高压蒸汽灭菌器、GHP-9160型隔水式恒温培养箱,上海利捷科学仪器有限公司; BSC-1600IIA2型Ⅱ级A2型生物安全柜,苏洁医疗器械(苏州)有限公司; Vortex-M型旋涡混匀仪,上海卓冀生物技术有限公司; 移液枪(带无菌枪头),量程为100~1000μL和20~200μL,南通万恒旭化工有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品准备

如表1所示，紫苏籽油和奇亚籽油是Omega-3脂肪酸 α -亚麻酸（ALA, C18: 3）含量最高的植物油^[12-14]，葡萄籽油和红花油富含Omega-6脂肪酸亚油酸（LA, C18: 2）^[15-17]，山茶油、橄榄油和高油酸葵花籽油以Omega-9脂肪酸油酸（OA, C18: 1）为主^[17-19]，海甘蓝籽油中的Omega-9以芥酸（C22: 1）为主，具有较高的单不饱和脂肪酸含量。

表1 各植物油脂中Omega-3、6、9大致含量

油脂种类	紫苏籽油/%	葡萄籽油/%	精炼奇亚籽油/%	山茶油/%	橄榄油/%	海甘蓝籽油/%	红花油/%	高油酸葵花籽油/%
Omega-3	>50	<1	>65	<1	<1	<5	<1	<1
Omega-6	>15	66~76	>15	8~10	5~10	5~15	37~77	5~15
Omega-9	20~35	12~27	10%~20	65~84	70~80	为主 70~90	12~52	75~85

通过米曲霉来源的脂肪酶对海甘蓝籽油和紫苏籽油分别进行水解反应，我们首先对酶解条件进行了优化，通过单因素实验发现，在温度39.5°C、pH=6.7、水油体积比1:2.0、酶用量0.6%（以油质量计）的条件下反应2h，海甘蓝籽油的甘油单酯转化率最高（可达57%），显著优于其他测试条件。因此，选定此条件为最终工艺参数^[20]。根据表2所示，发酵后的海甘蓝籽油和紫苏籽油中甘油单酯含量分别为57%和29%，表明通过发酵后部分甘油三酯发生了水解，得到相对分子质量更小的单酯结构。

表2 发酵油中的甘油三/单酯含量

发酵油种类	甘油三酯质量分数/%	甘油单酯质量分数/%
发酵海甘蓝籽油	43	57
发酵紫苏籽油	71	29

1.2.2 痢疾丙酸杆菌培养

按要求配制胰蛋白胨大豆肉汤（TSB）培养基，分装至试管，每管10 mL，121°C高压灭菌15 min。在菌液制备过程中，取痢疾丙酸杆菌（ATCC 11827）冻存菌种，接种于TSB培养基中，(36±1) °C厌氧培养48 h。用生理盐水调节菌液浓度至 $1\times 10^7\sim 1\times 10^8$ CFU/mL（麦氏比浊法或平板计数法校准）^[21]。

1.2.3. 抑菌圈实验

取灭菌TSB培养基，分别按1%、3%、5%（v/v）比例加入不同植物油脂，并设不加油脂的阴性对照（0%）。每管加入0.5 mL菌液，振荡混匀后，置于(36±1) °C厌氧培

养箱中培养72 h。培养结束后，取培养液梯度稀释，涂布于TSA平板，厌氧培养48 h后计数^[22, 23]。

1.2.5 统计学方法

数据分析用SPSS 28.0进行统计，结果用平均值Mean±标准差SD表示。各组间比较用配对样本t-test统计分析，统计分析均为双尾。当P<0.05时认为有显著差异，在图像中用“*”表示；当P≥0.05时，无显著性差异，在图像中用符号“n.s.”表示。

2. 结果与讨论

2.1 不同油脂对痢疾丙酸杆菌的增殖作用

设置阴性对照组为不添加任何植物油脂的TSB培养基，其余样品组在阴性对照组TSB培养基基础上加入不同体积分数（1%、3%和5%）的植物油脂，观察各植物油脂对痢疾丙酸杆菌的增殖作用（图1）。

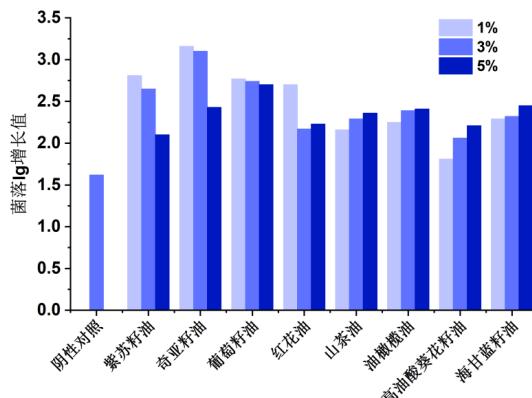


图1 各植物油脂在不同体积分数下对痢疾丙酸杆菌的增殖作用

2.2 发酵油对痢疾丙酸杆菌的增殖作用

对发酵后的紫苏籽油和海甘蓝籽油进行痢疾丙酸杆菌的增殖作用实验。在不同体积浓度下观察痢疾丙酸杆菌菌落的增长，并计算lg增长值，作图进行前后数值对比（图2）。

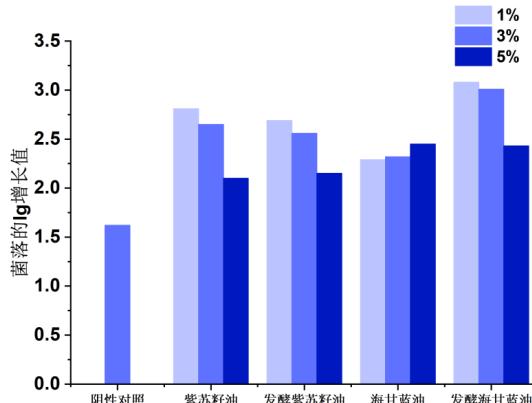


图2 各发酵油在不同体积分数下对痢疾丙酸杆菌的增殖作用

3. 结果与讨论

系统评估了不同脂肪酸构成的植物油脂在1%~5%体积分数下对痤疮丙酸杆菌增殖的影响(图1)。结果表明,油脂对痤疮丙酸杆菌的作用呈现出显著的“组成-浓度”依赖性。富含Omega-9的油脂(如山茶油、橄榄油、高油酸葵花籽油)在所有测试浓度下均表现出持续的促增殖作用,这一结果与痤疮丙酸杆菌的生理特性高度吻合:该菌能分泌脂肪酶,将甘油三酯分解为游离脂肪酸和甘油,作为主要的碳源和能源^[24]。Omega-9脂肪酸(如油酸)结构稳定、易于代谢,其降解产物(如丙酸)能够酸化局部环境,进一步创造利于痤疮丙酸杆菌生长的厌氧条件^[24]。因此,高Omega-9油脂本质上为细菌提供了丰富的营养来源。相比较之下,富含Omega-3的油脂(紫苏籽油和奇亚籽油)表现出独特的双向作用:在1%低浓度下促进生长,而在5%高浓度下则显著抑制细菌增殖。这种浓度依赖性来源于α-亚麻酸(ALA)的双重角色。低浓度时,ALA作为可被利用的多不饱和脂肪酸,支持细菌生长;然而,在高浓度下,其抑菌机制可能通过多种途径实现,例如膜结构破坏。多不饱和脂肪酸(如ALA)因其弯曲的分子结构,可有效插入并扰乱细菌细胞膜的磷脂双分子层,增加膜通透性,导致细胞内物质泄漏^[25]。后续研究可通过扫描电子显微镜(SEM)观察高浓度ALA处理后的细菌形态,或使用碘化丙啶(PI)等膜完整性荧光探针进行验证。其次是诱导氧化应激,ALA含有三个不饱和双键,化学性质活泼,易发生脂质过氧化反应,生成大量活性氧(ROS)和脂质过氧化物^[24],能够攻击细菌的蛋白质、核酸和膜脂,从而造成氧化损伤。后续研究将通过测定细菌内的ROS水平来验证此氧化应激机制。然而同为多不饱和脂肪酸,富含Omega-6亚油酸(LA)的葡萄籽油并未表现出显著抑菌性,而红花油在3%~5%浓度下显示出抑制效应。这种差异提示,脂肪酸的抑菌效力不仅与不饱和程度有关,还可能与其具体分子结构(如红花油中可能含有的共轭亚油酸CLA)及其对细菌群体感应系统的干扰能力有关^[26]。添加纯度的ALA、LA等标准品进行对比实验,将有助于在排除油脂中其他成分干扰的情况下,精确解析不同脂肪酸的构效关系。

脂肪酶催化水解改变了油脂的分子构成,从而可能影响其生物学功能。由表2可知,经米曲霉脂肪酶处理后,海甘蓝籽油中甘油单酯(MAG)含量高达57%,而紫苏籽油中MAG含量仅为29%。这种结构差异导致二者对痤疮丙酸杆菌的作用模式截然不同(图2)。发酵紫苏籽油因其

MAG含量较低,其作用模式与未发酵油相似,均表现为浓度依赖性的双向作用,且效应不显著。然而,发酵海甘蓝籽油则表现出全新的特性,在低浓度(1%)下,其高含量的MAG作为易于利用的碳源,强烈促进了细菌增殖;但当浓度升至5%时,却出现了显著的抑菌效果。该高浓度的MAG可能通过形成胶束来实现抑菌。当MAG在水相中达到临界胶束浓度(CMC)时,会自组装成胶束。这些胶束可能通过以下方式作用于细菌:(1)胶束对疏水性的细菌细胞膜具有高亲和性,可能通过吸附甚至包裹细菌,影响其正常的物质交换和跨膜信号传导^[27]。(2)高浓度表面活性剂可破坏脂质双分子层,导致细胞内容物泄漏。后续工作将通过动态光散射(DLS)测定发酵海甘蓝籽油的胶束粒径分布和ZETA电位,并通过表面张力法测定其CMC值。将细菌与达到CMC浓度前后的发酵油共培养,并利用荧光显微镜或流式细胞术观察细菌存活率的变化,将能为“胶束包裹”机制提供关键证据。

4. 结论

植物油脂对痤疮丙酸杆菌的作用远非简单的促进或抑制,而是由其脂肪酸组成、脂质分子结构和作用浓度共同决定的复杂过程。Omega-9油脂作为高效的碳源,普遍促进细菌增殖。高浓度Omega-3油脂展现出抑菌潜力,其机制可能与ALA引发的膜结构破坏和氧化应激有关,这为将其开发为天然抗菌成分提供了理论依据。酶发酵能通过生成高含量的甘油单酯(MAG),赋予油脂新的功能特性。发酵海甘蓝籽油在高浓度下表现出的抑菌作用,极有可能源于MAG形成的胶束的物理化学作用,这为设计新型的“智能”抗痤疮成分(在皮脂过多的高浓度环境下激活抑菌功能)开辟了新的思路。

参考文献

- [1] 安渝熙,丛林.寻常痤疮与代谢综合征[J].实用皮肤病学杂志,2020,13(06):359-362.
- [2] 易雪晴,王琳梓,方玉甫.中医药治疗痤疮的现状及研究进展[J].中国美容医学,2025,34(05):189-193.
- [3] 王晓晴.痤疮合剂对寻常痤疮的疗效观察及对皮肤油脂含量的影响[D].2017.
- [4] 黄咏梅.高原地区面部痤疮、玫瑰痤疮、湿疹及黄褐斑皮肤屏障功能评价及其临床意义[J].中国激光医学杂志,2021,30(01):36.
- [5] 李珊珊,赵旭,刘纪朋,等.寻常痤疮皮损炎症程度与外周血IL-8、TNF-α水平的相关性研究[J].中国现代医药杂志,2025,27(01):47-50.

- [6]邹粤,张莹莹,杨芬,等.基于痤疮丙酸杆菌诱导的细胞炎症模型研究温泉水的抗炎作用[J].现代预防医学,2024,51(22):4191-4198.
- [7]吴艳,牛悦青,陈璨,等.皮肤屏障与玫瑰痤疮相关性的研究进展[J].皮肤病与性病,2011,33(2):2.
- [8]邹薪,何黎,杨成,等.面部痤疮,湿疹,黄褐斑及日光皮炎皮肤屏障功能评价及其临床意义[J].中华皮肤科杂志,2013,46(1):4.
- [9]POLJŠAK NINA, GLAVAČ NINA KOČEVAR, RAVNIKAR MAT-JAŽ, et al. Influence of vegetable oils and their constituents on in vitro human keratinocyte and fibroblast proliferation and migration[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1):26898.
- [10]KHOPHLOIKLANG V., CHANAPIWAT P., KAEOKET K. Camellia oil with its rich in fatty acids enhances post-thawed boar sperm quality[J]. Acta Vet Scand, 2024, 66(1):6.
- [11]VLADIMÍR MAŠÁN, MATWIJCZUK ARKADIUSZ P., NIEMCZYNOWICZ AGNIESZKA, et al. Chemometric approach to characterization of the selected grape seed oils based on their fatty acids composition and FTIR spectroscopy[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1):19256.
- [12]ASIF M. Health effects of omega-3,6,9 fatty acids: Perilla frutescens is a good example of plant oils[J]. Orient Pharm Exp Med, 2011, 11(1):51-59.
- [13]KANGWAN N., PINTHA K., KHANAREE C., et al. Anti-inflammatory effect of Perilla frutescens seed oil rich in omega-3 fatty acid on dextran sodium sulfate-induced colitis in mice[J]. Res Pharm Sci, 2021, 16(5):464-473.
- [14]ULLAH R., NADEEM M., KHALIQUE A., et al. Nutritional and therapeutic perspectives of Chia (*Salvia hispanica L.*): a review[J]. J Food Sci Technol, 2016, 53(4):1750-8.
- [15]GARAVAGLIA J., MARKOSKI M. M., OLIVEIRA A., et al. Grape Seed Oil Compounds: Biological and Chemical Actions for Health[J]. Nutr Metab Insights, 2016, 959-64.
- [16]KURT C., ALTAF M. T., LIAQAT W., et al. Oil Content and Fatty Acid Composition of Safflower (*Carthamus tinctorius L.*) Germplasm[J]. Foods, 2025, 14:2.
- [17]RARBACK SHEAH. Essential Fatty Acids[M]. Springer International Publishing, Cham, 2020, 789-789.
- [18]ZENG J., WANG W., CHEN Y., et al. Typical Characterization of Commercial Camellia Oil Products Using Different Processing Techniques: Triacylglycerol Profile, Bioactive Compounds, Oxidative Stability, Antioxidant Activity and Volatile Compounds[J]. Foods, 2022, 11: 21.
- [19]SANTA-MARÍA C., LÓPEZ-ENRÍQUEZ S., MONTSERAT-RAT-DE LA PAZ S., et al. Update on Anti-Inflammatory Molecular Mechanisms Induced by Oleic Acid[J]. Nutrients, 2023, 15:1.
- [20]邓琳芬,郑毅,王娅,等.米曲霉产脂肪酶的发酵条件优化[J].海峡科学,2010(10):12-14.
- [21]GAJDÁCS M., SPENGLER G., URBÁN E. Identification and Antimicrobial Susceptibility Testing of Anaerobic Bacteria: Rubik's Cube of Clinical Microbiology[J]. Antibiotics (Basel), 2017, 6:4.
- [22]BLASKOVICH M. A. T., ELLIOTT A. G., KAVANAGH A. M., et al. In vitro Antimicrobial Activity of Acne Drugs Against Skin-Associated Bacteria[J]. Sci Rep, 2019, 9(1):14658.
- [23]DESBOIS A. P., LAWLOR K. C. Antibacterial activity of long-chain polyunsaturated fatty acids against *Propionibacterium acnes* and *Staphylococcus aureus*[J]. Mar Drugs, 2013, 11(11):4544-57.
- [24]WILLE J. J., KYDONIEUS A. Palmitoleic acid isomer (C16:1delta6) in human skin sebum is effective against gram-positive bacteria[J]. Skin pharmacology and applied skin physiology, 2003, 16(3):176-187.
- [25]DUH PIN-DER, YEN WEN JYE, YEN GOW-CHIN. Oxidative stability of polyunsaturated fatty acids and soybean oil in an aqueous solution with emulsifiers[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1999, 76(2):201-204.
- [26]ESMAEL AHMED, HASSAN MERVAT G., AMER MAHMOUD M., et al. Antimicrobial activity of certain natural-based plant oils against the antibiotic-resistant acne bacteria[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2020, 27(1):448-455.
- [27]SINGH D., KUMAR T. R., GUPTA V. K., et al. Antimicrobial activity of some promising plant oils, molecules and formulations[J]. Indian J Exp Biol, 2012, 50(10):714.

Research on the Proliferative Effect of Plant Oils on *Cutibacterium acnes*

Chen Yi*, Lin Lin, Xu Si-wei, Wang Rui-rui

(Shanghai Corday Biotechnology Co., LTD, Shanghai, 201703)

Abstract : This study investigated the effects of various plant oils and their fermented products on the proliferation of *Cutibacterium acnes*. By measuring bacterial growth under 1%, 3%, and 5% (v/v) oil treatments, we found that omega-3-rich perilla seed oil and chia seed oil promoted bacterial growth at low concentrations but exhibited antibacterial effects at high concentrations (5%), potentially due to α -linolenic acid-induced membrane disruption and oxidative stress. Omega-6-rich grape seed oil showed no significant inhibition, while safflower oil at 3-5% concentrations suppressed bacterial proliferation, possibly through conjugated linoleic acid-mediated quorum sensing interference. High omega-9 oils (e.g., camellia oil, olive oil) consistently promoted bacterial growth with increasing concentrations as they served as carbon sources. Notably, after fermentation with *Aspergillus oryzae* lipase, crambe seed oil containing 57% monoglycerides stimulated bacterial growth at low concentrations but formed inhibitory micelles at high concentrations, whereas fermented perilla seed oil with only 29% monoglycerides showed minimal effects. These findings provide theoretical support for applying plant oils in anti-acne products, suggesting that high-concentration omega-3 oils and specific fermented oils may possess antibacterial potential.

Keywords : *cutibacterium acnes*; chia seed oil; perilla seed oil; fermented oil; proliferation