

发酵原料对细菌纤维素产量的影响研究进展

夏文¹ 李政^{1,*} 徐银莉¹ 巩继贤¹ 贾士儒² 张健飞¹

(1.天津工业大学纺织学院 先进纺织复合材料教育部重点实验室 天津 300387;
2.天津科技大学 工业发酵微生物教育部重点实验室 天津 300457)

摘要:与天然纤维素相比,细菌纤维素具有高持水性、高机械强度、良好生物相容性等独特性能。细菌纤维素属于多孔纳米级生物材料,在催化剂、分离膜、食品、纺织、生物医学等领域具有广泛的应用。然而,产量低、成本高的问题阻碍了其进一步应用。研究发酵原料对细菌纤维素产量的影响具有重大的现实意义。因此,本文阐述了近年来国内外关于细菌纤维素发酵原料(主要为碳氮源和添加物)的研究进展,并对未来的发展进行展望。

关键词:细菌纤维素,发酵原料,碳氮源,添加物

Progress in the influence of the fermentation feedstocks on bacterial cellulose production

XIA Wen¹ ,LI Zheng^{1,*} ,XU Yin-li¹ ,GONG Ji-xian¹ ,JIA Shi-ru² ,ZHANG Jian-fei¹

(1.Key Laboratory of Advanced Textile Composites School of Textiles ,
Tianjin Polytechnic University ,Ministry of Education ,Tianjin 300387 ,China;
2.Key Laboratory of Industrial Fermentation Microbiology ,Ministry of Education ,
Tianjin University of Science and Technology ,Tianjin 300457 ,China)

Abstract: Bacterial cellulose (BC) is a porous, nanoscale and biological polymer, which has special properties of high hydrophilicity, high mechanical strength and good biocompatibility, compared with native cellulose. Therefore, BC has many potential applications including catalyst, separation membrane, food, textile and biomedical science. However, the problems of low yield and high production cost have prevented BC applications. The study of influence of the fermentation feedstocks on bacterial cellulose production has a great practical significance. The recent developments of feedstocks in fermentation, especially in carbon sources, nitrogen sources and additives were summarized in this review. The potential feedstocks and their development in future were also described.

Key words: bacterial cellulose; fermentation material; carbon and nitrogen source; additive

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)02-0358-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.02.061

细菌纤维素(Bacterial Cellulose,简称BC)是具有三维网状结构的多孔纳米级生物高分子聚合物,其纤维直径和宽度仅为棉纤维的1/100~1/1000^[1]。与植物纤维素相比,BC具有高纯度、聚合度和结晶度,良好的持水、透气性、生物相容性和可降解性等优点^[2]。在产细菌纤维素的菌种中,木醋杆菌(*G.xylinus*或*A.xylinus*,简称G.X或A.X)以适应性强、纤维素产量较高等优势成为模式菌种。细菌纤维素产业化发展一直面临着成本高、产量低的问题,因此

研究在发酵过程中菌种代谢及培养原料对BC产量的影响,是未来细菌纤维素产业化发展必要的研究方向。本文从细菌纤维素发酵原料,尤其是碳源、氮源和添加物方面对细菌纤维素发酵制备进行综述,并对其未来发展作出展望。

1 碳源

二十世纪五十年代,Hestrin等研究出以葡萄糖为碳源,蛋白胨与酵母膏为氮源,有机酸与无机盐等缓冲溶液组成的HS培养基,用于生产BC^[3]。但其

收稿日期: 2016-06-17

作者简介: 夏文(1992-),男,硕士研究生,研究方向:细菌纤维素构效关系,E-mail: 18322726553@163.com。

* 通讯作者: 李政(1978-),男,博士,副教授,研究方向:纺织微生物技术,E-mail: lizheng_nx@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31200719,51403152,51473122);天津市应用基础及前沿技术研究计划(14JCQNJC14200);天津市科技支撑项目(09ZCKFSH00800);天津市科技特派员项目(16JCTPJ144400);应用化学与生态染整工程浙江省重中之重学科开放基金(YR2012014);国家级大学生创新创业训练计划资助项目(201510058032)。

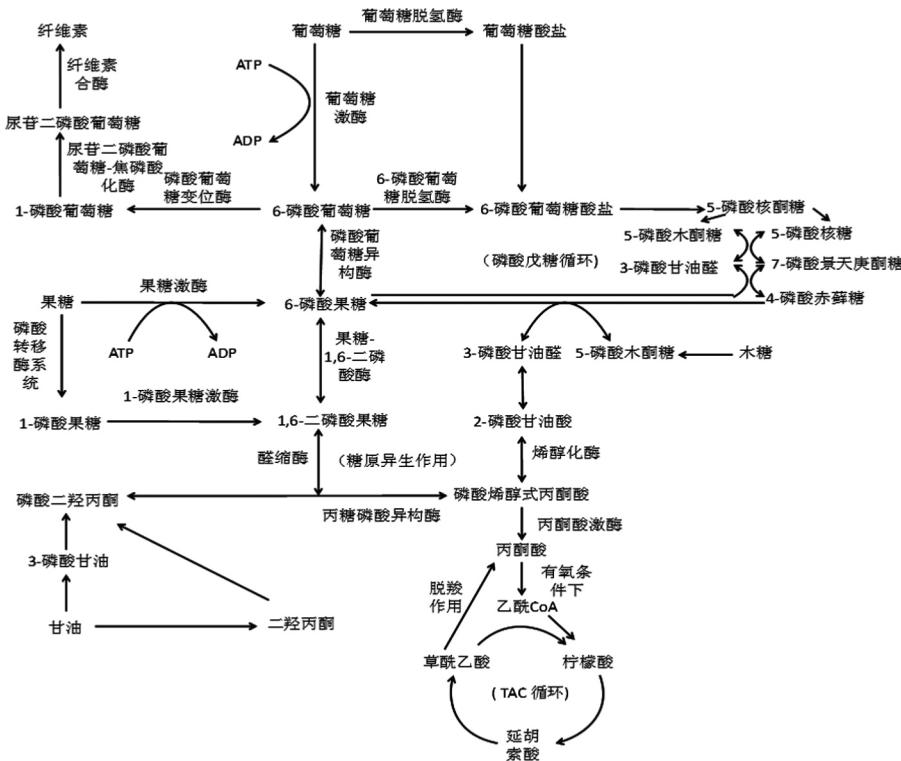


图1 木醋杆菌合成纤维素的主要途径

Fig.1 The principal pathway of cellulose synthesis in *Acetobacter xylinum*

生产成本大约为 250 \$ /kg, 这样昂贵的价格并不适用于工业化生产。

1.1 合成碳源

糖类和醇类物质是 BC 发酵原料中最常见的合成碳源。图 1 是 *G.xylinus* 中纤维素合成的主要代谢过程。

人们大量研究糖类单体的代谢过程, 以期了解纤维素合成的关键影响因素。张硕等^[4] 以七种糖类为碳源生产 BC, 发现低浓度下 (25 g/L) 的糖利用率更高, 且 D- 果糖生产的 BC 产量最多, 达 13.9 g/L。原因可能是该菌中焦磷酸化酶和磷酸葡萄糖异构酶活性较高, 并且 D- 果糖可以激发依赖于磷酸烯醇式丙酮酸的磷酸转移酶系统, 并催化果糖转化成 1- 磷酸果糖, 然后进一步转化为 6- 磷酸果糖, 再通过异构化作用转化成 6- 磷酸葡萄糖, 继而形成纤维素。

混合糖似乎可以提高 BC 的产量。马霞^[5] 分别以总量为 20 g/L 的葡萄糖、果糖、蔗糖以及它们的两两混合物 (1:1) 为碳源生产 BC, 发现葡萄糖、果糖为碳源的 BC 产量为 2.1、1.8 g/L, 而以葡萄糖与果糖为混合碳源时的产量可达 2.55 g/L。类似的, Premjet^[6] 添加 2.45% 蔗糖和 0.7% 果糖到不含 2% 葡萄糖的 HS 培养基, 其 BC 产量是 HS 标准培养基的 179%。虽然菌种和培养条件的差异会导致最优混合糖种类和含量的不确定性, 但是混合糖在 BC 生产中发挥的这种协同作用, 可能是由于多种糖代谢使得己糖磷酸更多地通过异构化作用进入纤维素合成途径。

醇类作碳源, 主要是转换成糖类后进行纤维素生产代谢。Mikkelsen 等^[7] 发现, 不同碳源在不同发酵阶段生产 BC 的能力不同, 其中甘露醇、甘油、蔗糖

培养基在发酵 48 h 时生产的 BC 分别为 2.04、0.82 和 0.34 g/L, 在发酵终点分别达 3.37、3.75 和 3.83 g/L。分析醇类代谢途径, 在发酵前期, 甘露醇可快速转化为果糖并穿过菌体细胞膜后参与纤维素合成, 同时合成的葡萄糖酸盐较少, pH 相对稳定, 甘油需要通过草酰乙酸的脱羧作用生成丙酮酸, 再经过葡萄糖异生作用生成己糖, 而蔗糖不易穿过菌体细胞膜, 需在细胞膜外先转化成葡萄糖和果糖; 而在发酵后期, 甘油和蔗糖产生的己糖可大量转化为纤维素。类似的, Mohammadkazemi^[8] 将枣浆、葡萄糖、甘露醇、蔗糖和食品级蔗糖五种碳源分别添加到 Zhou 培养基中培养 7 d, 最终添加甘露醇的培养基获得了最大的产量 1.8 g/L。

由于菌种和培养条件的差异性, 不同碳源培养基发酵 BC 的产量具有一定的差异性。综合考虑糖类、醇类碳源对 BC 产量的影响, 糖类的果糖、蔗糖和醇类的甘露醇、甘油是大多数 *G.xylinus* 可利用的较好碳源。但是使用这类纯度高的碳源价格相对昂贵, 只适用于实验室研究和小型发酵生产, 并不适用于 BC 的大量工业化生产。

1.2 天然碳源

合成碳源生产 BC 显然是不经济的, 因此工农业废弃物的资源化利用成为一个热点, 其中主要包括了水果类、糖蜜类、淀粉类和纤维素类碳源的利用。

1.2.1 水果类碳源 工农业水果类废弃物, 如椰子水、菠萝汁等, 营养物质丰富, 且来源丰富、预处理方式简单, 但需注意结合底物特性来选择最优的生产菌种。Gayathry 等^[9] 首先从蔗糖汁中分离出 *A.xylinum* sju-1 菌种, 并用标准培养菌 *A.xylinum* NCIM

2526 作对比 转接到在 HS 和改性椰水胚乳 MCLE 培养基中静态培养 14 d 后 *sju-1* 在 HS 和 MCLE 培养基中分别生产出 14.10 g/L 和 15.4 g/L 的 BC ,而 NCIM 2526 仅生产了 11.1 g/L 和 9.8 g/L 的 BC 。因此 ,与 HS 培养基对比 ,MCLE 培养基中 BC 的合成产量增加显著 ,且 BC 中含水量和粗纤维量更多。

水果原料与工农业废弃物的结合 ,也为 BC 工业化发酵生产提供了一个新的思路。 Casarica 等^[10] 研究利用劣质梨和甘油为碳源生产 BC ,通过使用 Taguchi 优化模型对该培养基进行优化 ,并达到 7.1 g/L 的最大产量 ,远高于大多数单纯利用水果碳源培养 BC 的报道。

水果类碳源的研究 ,目前正在从已工业化的利用椰子水生产 BC 的研究转向更具前景的农业废弃物菠萝汁、甘蔗汁等的研究。此外 ,混合水果为碳源也发挥出一定的价格优势 ,获得的 BC 产量也比较可观。虽然水果原料具有很多优势 ,但产品的质量变化较大 ,同时受地域和季节影响较大。因此 ,不但需要因地制宜得利用在特定地区供应丰富、价格低廉的水果为原料进行生产 ,还要积极开发适合于培养基类型的菌种 ,并结合菌种代谢特征优化培养基方案 ,得到具有特定应用要求的 BC 产品。

1.2.2 糖蜜类碳源 糖蜜含有大量可发酵性蔗糖 ,但是含有胶体、色素等抑制物质 ,因此需要经过稀释、酸化和加热等预处理 ,以达到沉降除灰、将低聚糖转化为单糖以及聚集胶体、降低糖蜜粘度的作用。 Bae^[11] 研究了硫酸热预处理糖蜜对 BC 生产的影响 ,当硫酸热处理 23 g/L 的糖蜜后 ,糖蜜中的蔗糖被分解成果糖和葡萄糖 ,使得总糖量为 40 g/L ,BC 产量比未处理糖蜜提高了 76% ,达 5.3 g/L 。这虽没有总糖浓度为 39% 的玉米浆/果糖培养基得到的 BC 多 (7.5 g/L) ,但生产成本大约为后者的百分之一。

除了常用的甘蔗、甜菜糖蜜 ,Li 等^[12] 以蜜枣糖蜜废液为唯一碳源生产 BC ,通过对 200 g/L 的枣汁废液进行适当稀释以及硫酸热预处理 ,使得水解液中葡萄糖达到 38 g/L ,比未处理废液提高 58% ,同时生产的 BC 产量提高了 50% 。

利用糖蜜为碳源的研究 ,不仅有助于解决生产高附加值细菌纤维素的成本问题 ,同时还能解决加工行业广泛存在的环境污染问题。但是由于其已广泛应用于酒精、氨基酸和有机酸等的发酵生产 ,其原料会存在供应稳定性的问题 ,因此在综合成本因素下 ,可在一些制糖业发达的地区适当发展。

1.2.3 淀粉类碳源 利用魔芋、大米、土豆等淀粉类食品废物经过预处理后产生的糖化液为碳源 ,逐渐显示出一个更为经济的选择。魔芋块茎的主要成分为魔芋葡甘露聚糖 ,通过酸水解可得到葡萄糖以及甘露糖的混合液。洪枫^[13] 通过对魔芋硫酸水解、活性炭脱毒后 ,以糖浓度为 25.5 g/L 的酸解液为碳源 ,最终制得 7.5 g/L 的 BC ,比同样碳浓度的葡萄糖、蔗糖的发酵产量提高近 50% 。这不但省去了精加工的成本 ,而且魔芋中含有的蛋白质、维生素等元素可以促进 BC 的合成 ,使得水解液同时兼具了价格低廉以及适合微生物生长的优点。

相对于成分复杂的原料而言 ,稀释具有很好的促进作用。因此 ,除了对原料进行水解、脱毒预处理 ,有些研究者将原料简单稀释后直接使用。 Thompson^[14] 以不经过任何水解处理的马铃薯稀释液为原料 ,培养 14 d 生产出比 HS 培养基多 21% 的产量 ,达到 2.47 g/L ,这可能是因为马铃薯稀释液中高温高压未杀死的细菌 ,不但可以将淀粉转化成葡萄糖 ,而且能将葡萄糖酸盐转化成有机酸 ,为纤维素的合成提供能源及生产基质。这类研究省去了淀粉类原料成本消耗较大的预处理过程 ,有很好的借鉴作用。

淀粉类原料同样面临着与糖蜜原料类似的问题 ,与生产其他生物类产品会发生争夺原料的问题 ,因此利用淀粉类原料发酵生产细菌纤维素时 ,应主要集中在非粮食作物、食品加工业废弃物等的研究。

1.2.4 纤维素类碳源 植物纤维素是地球上储量最丰富的可再生聚糖类资源 ,但由于植物纤维素分子间及分子内具有极强的氢键作用 ,因此生产细菌纤维素前需要进行水解 ,并对水解液进行解毒。 Guo^[15] 对含有 20 g/L 葡萄糖的云杉水解液通过不同解毒方法进行处理发现 ,经过活性炭解毒后的云杉水解液培养得到的 BC 产量最高 ,可达到 8.2 g/L 。

大量废弃纤维素织物的利用 ,也是一个重要的研究方向。 Hong^[16] 采用离子溶液 1- 烯丙基 -3- 甲基咪唑氯化物 ([AMIM]Cl) 来水解棉织物 ,培养获得的 BC 达到 10.8 g/L ,其比葡萄糖为碳源的培养基产量高出 83% ,并且抗张强度也高出了 79% ,这使得用 [AMIM]Cl 预处理后的废弃棉织物成为一种生产高品质 BC 很有潜力的原料。但纤维素类原料生产 BC 还存在着预处理过程复杂、水解液中成分不确定等问题。

因此 ,利用成分复杂的农林废弃物混合碳源生产 BC ,不仅可以降低生产成本、将产品转化为高附加值材料 ,同时可以解决废弃物的环境污染问题。

2 氮源

氮源主要用于构成菌体细胞物质如蛋白质、核酸等以及合成含氮代谢物 ,主要分为无机氮源和有机氮源。

2.1 无机氮源

无机氮源 ,如磷酸铵、硫酸铵等通常对调节发酵过程的 pH 有积极作用 ,并对 BC 的产量可以起到一定的促进作用。但针对成分复杂的工农业废弃物培养基中 ,其添加应避免与培养基成分生成阻碍 *G.xylinus* 生长及 BC 生成的抑制物。

在碳源浓度为 47、11.5 g/L 的粗甘油 (crude glycerol residue ,简称 Cgly) 和葡萄果皮 (Grape skins ,简称 GS) 培养基中 ,Carreira^[17] 研究额外添加有机或无机氮源对 BC 产量的影响 ,当在 Cgly 中添加 4 g/L 酵母膏或 4 g/L 酵母膏 +2 g/L KH₂PO₄ 时 ,BC 产量均能提高近 200% 到 0.5 g/L ,而添加 3.3 g/L 的 (NH₄)₂SO₄ 后观察不到 BC 的产生 ,这可能是因为 (NH₄)₂SO₄ 与 Cgly 中的成分生成了不利于 *G.xylinus* 生长或 BC 合成的抑制物; 而在 GS 中添加 3.3 g/L

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 2 \text{ g/L KH}_2\text{PO}_4$ 后的 BC 产量最高, 可提高 85% 到 1 g/L, 说明 GS 中缺少氮、磷元素, 氮源的加入可以显著的提高 BC 的产量。类似的, Vazque^[18] 将 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 添加到生物甘油培养基中时, 也观察不到纤维素的形成。

2.2 有机氮源

有机氮源, 主要包括生物试剂酵母膏、蛋白胨以及工农业废弃物玉米浆、酒糟水等。生物试剂有机氮源营养物质丰富, 而工农业废弃物氮源成分复杂, 通常需要经过合适的预处理过程降低副作用, 优化培养基成分来最大限度的发挥其廉价、环境友善的特点。

玉米浆 (CSL) 是一种营养丰富的有机氮源。Rani^[19-20] 以咖啡樱桃皮 (coffee cherry husk, 简称 CCH) 为碳源, 静态培养 14 d, 考察 CSL 对 CCH 产 BC 的影响。结果发现, 用 CSL 为氮源的 BC 产量是 HS 培养基产量的三倍, 达到 5.6 g/L, 原因可能是 CSL 中含有的乳酸氧化成丙酮酸产生能量, 促进 TCA 循环从而刺激细胞生长, 导致纤维素产量提高; 除了刺激细胞生长外, 高浓度 CSL 还可抵消 pH 变化的副作用, 使得 pH 保持相对稳定, 适合 *G.xylinus* 的生长并产生更多的 BC。

酒糟水 (thin stillage, 简称 TS) 是来自米酒酒厂的富含氨基酸和有机酸的废水。Wu^[21] 用 TS 代替蒸馏水配制 HS 培养基后, BC 产量增加了 2.5 倍达到 10.38 g/L; 此外, 他将 TS 和 HS 以 1:1 混合生产 BC, 培养 7 d 后, BC 产量比 HS 培养基提高了 50%, 达到 6.26 g/L, 同时生产成本降低了 67%^[22]。啤酒废酵母 (waste beer yeast, 简称 WBY) 也是一种营养丰富的啤酒厂废弃物, Lin 等^[23] 用 WBY 含量为 15% 的培养基作为唯一营养源来生产 BC, 首先经过超声波处理 40 min, 其次在 pH 为 2, 121 °C 下, 水解 20 min, 获得的还原糖产率达 29.19%, 还原糖浓度达 4.38%。同时, 为了确定该培养基生产 BC 的最适还原糖浓度, 发现还原糖量为 3% 的 WBY 培养基发酵的 BC 产量是未预处理 WBY 培养基的 6 倍, 达到 7.02 g/L。

3 添加物

为了大规模、低成本地生产 BC, 除了需要碳、氮源提供菌体发酵生产所需的营养物质外, 还需要额外的添加物来稳定培养基条件, 使得发酵过程持续高效进行。这些添加物主要包括, 低聚糖、醇类、有机酸、维生素等。它们稳定培养条件的机理是, 通过增加培养基粘度从而减少剪切力的作用, 或者改变细胞类型, 或者抑制葡萄糖酸的形成^[24]。

3.1 低聚糖

在发酵过程中剪切力和溶氧是影响菌体发酵效果的重要因素, 剪切力小且溶氧大是 BC 生产菌的较佳发酵环境, 而水溶性低聚糖 SSGO、Acetan、琼脂等可通过增加发酵液粘度, 防止细胞与 BC 聚合, 增加氧传递系数来提高纤维素的合成产量。

Ha^[25] 将以 α 键连接而成的低聚糖 SSGO 添加到以 *A.xylinum* 为菌种的培养基中, 15 d 静置培养后产量提升了 89.3%。Ishida^[26] 以一株因缺失 *aceA* 基因

而不能合成水溶性多糖 Acetan 的突变株 EP1 来生产 BC, 结果发现得到的 BC 产量比正常株要低, 而当添加 Acetan 到培养基后 BC 产量又恢复到了正常菌株生产的产量, 同时添加后的培养基黏性变大, 细胞数量更多, 能够防止细胞和 BC 聚合; Song^[27] 在气升式泡罩塔生物反应器中, 使用糖化食品废弃物作为生产 BC 的底物, 当添加 0.4% 的琼脂进去, BC 的产量提高了 10%, 在 10 L 的反应器中培养 3 d 可以生产出 5.6 g/L 的 BC。

3.2 醇类、有机酸

醇类除了可用作碳源, 较低浓度的乙醇还会减少细胞突变成不产纤维素细胞的概率, 并最终提高 BC 产量^[28]。Lu^[29] 调查了六种不同浓度醇类对 BC 的刺激, 结果正丁醇在少于 1.5% 浓度下才能提高 BC 的产量, 然而甘露醇几乎可以在任何浓度下刺激 BC 的生产, 且醇类物质作用主要发挥在发酵的后期。

有机酸通常不作为生产 BC 的碳源, 而是作为产生 ATP 的能源物质。马霞^[30] 在静置培养条件下添加了不同浓度的醋酸、柠檬酸发现, 低浓度的醋酸可弥补葡萄糖降解生成高能化合物的那部分能量, 使得葡萄糖转化为纤维素的量增加, 但随浓度升高, 由于 pH 降低抑制了细胞生长, 产率下降; 柠檬酸也可作为能源物质参与 TCA 循环, 在细胞生长早期可以促进入代谢流从纤维素合成转向 TCA 循环, 产生能量加速细胞生长, 进而提高 BC 产率。

3.3 其他添加物

维生素 C 是一种高水溶性化合物, 具有低的分子量 (176.12) 和空间位阻, 但与 BC 纤维之间的亲和性较高。Keshk^[31] 添加 0.5% 的维生素 C 到 HS 培养基中, 葡萄糖酸产量下降, BC 产量达到 15.7 g/L, 且 BC 结晶度由 HS 的 86% 下降到 62%。多酚类物质与维生素 C 似乎有着类似的作用。Keshk^[32] 在 HS 培养基中添加 1% 的木质素磺酸盐, 葡萄糖酸的量下降, BC 产量提高了近 57%, 且膜有更高的结晶度。

此外, Cheng^[33-34] 添加了 1.5% 的羧甲基纤维素 CMC 到培养基中, 其获得的最大 BC 产量为 13 g/L, 是不添加组的 1.7 倍, 同时发现生成的 BC 结晶度和晶粒大小有所下降, 因此拥有了更高的持水性和溶解温度; Hu 考察了对植物起抗衰老作用的 1-甲基环丙烯 (1-MCP) 对 BC 的影响^[35], 他将 0.14 mg 的 1-MCP、100 mg 的葡萄糖分别在不同培养时间加到培养基中, 培养 12 d 后发现 BC 产量最高可提高 25.4%, 且产物中不含 1-MCP, 这证实了 1-MCP 在 BC 发酵过程只起调节作用。

4 展望

针对 BC 生产成本高、产量低的问题, 首先要尝试用各种诱变方法或基因工程技术对菌株进行改造, 并结合底物特性、生产方式、应用前景等筛选出最优菌种; 其次, 在碳源方面, 不但要开发原料易得且对环境友好的糖蜜碳源的利用方向, 还应重点解决来源广、成本低的纤维素碳源的预处理工艺问题; 在氮源方面, 对营养物质丰富的酒糟水、玉米浆等预处理、除杂方式进行深入研究; 在添加物方面, 充分

发挥增效因子的增产作用,最优化提高BC产量。

因此,BC培养基原料的合适选择,是一项长期而深入的研究。低成本、高产量培养基的开发将会使工业化生产BC的原材料选择范围更广,对于推动BC产业的扩大化进程具有非常重要的意义。

参考文献

- [1] Shi Z ,Zhang Y ,Phillips G O ,et al. Utilization of bacterial cellulose in food [J].Food Hydrocolloids 2014 ,35(1) :539–545.
- [2] 汪丽粉 李政 贾士儒 等.细菌纤维素性质及应用的研究进展 [J].微生物学通报 2014 ,41(8) :1675–1683.
- [3] Schramm M ,Hestrin S. Factors affecting production of cellulose at the air/liquid interface of a culture of *Acetobacter xylinum* [J]. Journal of General Microbiology ,1954 ,11 (1) :123–129.
- [4] 张硕 杜倩雯 兰水 等.七种糖类对木醋杆菌和红茶菌的影响 [J].纤维素科学与技术 2014 ,22(4) :18–27.
- [5] 马霞 王瑞明 关凤梅 等.糖源对细菌纤维素产量的影响 [J].纤维素科学与技术 2002 ,10(3) :31–34.
- [6] Premjet S ,Premjet D ,Ohtani Y. The effect of ingredients of sugar cane molasses on bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* ATCC 10245 [J].Sen-I Gakkaishi 2007 ,63 (8) :193–199.
- [7] Mikkelsen D ,Flanagan B M ,Dykes G A ,et al. Influence of different carbon sources on bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus* strain ATCC 53524 [J]. Journal of Applied Microbiology 2009 ,107(2) :576–583.
- [8] Mohammadkazemi F ,Azin M ,Ashori A. Production of bacterial cellulose using different carbon sources and culture media [J].Carbohydrate Polymers 2015 ,117(117) :518–523.
- [9] Gayathry G ,Gopalaswamy G. Production of Bacterial Cellulose from Coconut Liquid Endosperm using *Acetobacter xylinum* sju-1 [J]. Journal of Pure and Applied Microbiology ,2013 ,7 (3) :2389–2395.
- [10] Casarica A ,Moscovici M ,Ghiorghita A ,et al. Pears and glycerol—carbon source for economical production of bacterial cellulose [J]. Current Opinion in Biotechnology ,2013 ,24 (1) :S115.
- [11] Bae S O ,Shoda M. Production of bacterial cellulose by *Acetobacter xylinum* BPR2001 using molasses medium in a jar fermentor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology ,2005 ,67 (1) :45–51.
- [12] Li Z ,Wang L ,Hua J ,et al. Production of nano bacterial cellulose from waste water of candied jujube-processing industry using *Acetobacter xylinum* [J].Carbohydrate Polymers 2015 ,120: 115–119.
- [13] 洪枫 李慧 杨光 等.一种利用魔芋作为廉价碳源生产细菌纤维素的方法 [P].2011-01-12.
- [14] Thompson D N ,Hamilton M A. Production of bacterial cellulose from alternate feedstocks [J].Applied Biochemistry and Biotechnology 2001 ,91–93(1) :503–513.
- [15] Guo X ,Cavka A ,Jonsson L J ,et al. Comparison of methods for detoxification of spruce hydrolysate for bacterial cellulose production [J].Microbial Cell Factories 2013 ,12 (1) :93.
- [16] Hong F ,Guo X ,Zhang S ,et al. Bacterial cellulose production from cotton – based waste textiles: Enzymatic saccharification enhanced by ionic liquid pretreatment [J]. Bioresource Technology 2012 ,104 (1) :503–508.
- [17] Carreira P ,Mendes J A S ,Trovatti E ,et al. Utilization of residues from agro – forest industries in the production of high value bacterial cellulose [J]. Bioresource Technology ,2011 ,102 (15) :7354–7360.
- [18] Vazquez A ,Laura Foresti M ,Cerrutti P ,et al. Bacterial Cellulose from Simple and Low Cost Production Media by *Gluconacetobacter xylinus* [J]. Journal of Polymers and the Environment 2013 ,21(2) :545–554.
- [19] Rani M U. Statistical Optimization of Medium Composition for Bacterial Cellulose Production by *Gluconacetobacter hansenii* UAC09 Using Coffee Cherry Husk Extract – an Agro – Industry Waste [J].Journal of Microbiology and Biotechnology ,2011 ,21 (7) :739–745.
- [20] Rani M U ,Appaiah K A A. Production of bacterial cellulose by *Gluconacetobacter hansenii* UAC09 using coffee cherry husk [J].Journal of Food Science and Technology – Mysore ,2013 ,50 (4) :755–762.
- [21] Wu J ,Liu R. Thin stillage supplementation greatly enhances bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus* [J]. Carbohydrate Polymers 2012 ,90(1) :116–121.
- [22] Wu J ,Liu R. Cost-effective production of bacterial cellulose in static cultures using distillery wastewater [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering 2013 ,115(3) :284–290.
- [23] Lin D ,Lopez-Sanchez P ,Li R ,et al. Production of bacterial cellulose by *Gluconacetobacter hansenii* CGMCC 3917 using only waste beer yeast as nutrient source [J]. Bioresource Technology ,2014 ,151C(1) :113–119.
- [24] Lin S ,Loira Calvar I ,Catchmark J M ,et al. Biosynthesis ,production and applications of bacterial cellulose [J]. Cellulose ,2013 ,20(5) :2191–2219.
- [25] Ha J H ,Park J K. Improvement of bacterial cellulose production in *Acetobacter xylinum* using byproduct produced by *Gluconacetobacter hansenii* [J]. Korean Journal of Chemical Engineering 2012 ,29(5) :563–566.
- [26] Ishida T ,Sugano Y ,Nakai T ,et al. Effects of Acetan on Production of Bacterial Cellulose by *Acetobacter xylinum* [J]. Bioscience ,Biotechnology and Biochemistry ,2014 ,66 (8) :1677–1681.
- [27] Song H ,Li H ,Seo J ,et al. Pilot-scale production of bacterial cellulose by a spherical type bubble column bioreactor using saccharified food wastes [J]. Korean Journal of Chemical Engineering 2009 ,26 (1) :141–146.
- [28] Hyun J Y ,Mahanty B ,Kim C G. Utilization of Makgeolli Sludge Filtrate (MSF) as Low – Cost Substrate for Bacterial Cellulose Production by *Gluconacetobacter xylinus* [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology 2014 ,172(8) :3748–3760.
- [29] Lu Z ,Zhang Y ,Chi Y ,et al. Effects of alcohols on bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* 186 [J].World Journal

- of Microbiology and Biotechnology 2011, 27(10): 2281-2285.
- [30] 马霞, 王瑞明, 关凤梅, 等. 非碳水化合物对木醋杆菌合成细菌纤维素影响规律的初探 [J]. 中国酿造, 2003, (4): 15-17.
- [31] Keshk S M A S. Vitamin C enhances bacterial cellulose production in *Gluconacetobacter xylinus* [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 99(1): 98-100.
- [32] Keshk S, Sameshima K. Influence of lignosulfonate on crystal structure and productivity of bacterial cellulose in a static culture [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, 40(1): 4-8.
- [33] Cheng K, Catchmark J M, Demirci A. Effects of CMC

(上接第 331 页)

有抑制作用。五倍子 + KGM 涂膜液可以通过抑制油脂的氧化和微生物的生长, 延缓冷鲜肉的腐败和颜色的变化。在 4 ℃ 贮藏条件下, 经五倍子 / KGM 涂膜液涂膜的冷鲜猪肉, 与未经涂膜处理的冷鲜猪肉相比, 能延长货架期 5 d。因此, 五倍子 / KGM 涂膜液具有保鲜肉类产品应用前景。

参考文献

- [1] Lucera A, Costa C, Conte A, et al. Food applications of natural antimicrobial compounds [J]. Frontiers in Microbiology, 2012, 3: 287.
- [2] Shan B, Cai Y Z, Brooks J D, et al. Antibacterial and antioxidant effects of five spice and herb extracts as natural preservatives of raw pork [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2009, 89(11): 1879-1885.
- [3] Devatkal S K, Kumboj R, Paul D. Comparative antioxidant effect of BHT and water extracts of banana and sapodilla peels in raw poultry meat [J]. Journal of Food Science & Technology, 2014, 51(2): 387-391.
- [4] Hernández-Ochoa L, Aguirre-Prieto Y B, Nevárez-Moorillón G V, et al. Use of essential oils and extracts from spices in meat protection. [J]. Journal of Food Science & Technology, 2014, 51(5): 957-963.
- [5] Zhang H, Kong B, Xiong Y L, et al. Antimicrobial activities of spice extracts against pathogenic and spoilage bacteria in modified atmosphere packaged fresh pork and vacuum packaged ham slices stored at 4 ℃ [J]. Meat Science, 2009, 81(4): 686-692.
- [6] Tian F, Li B, Ji B, et al. Identification and structure-activity relationship of gallotannins separated from *Galla chinensis* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(7): 1289-1295.
- [7] Huang X L, Liu M D, Li J Y, et al. Chemical composition of *galla chinensis* extract and the effect of its main component(s) on the prevention of enamel demineralization *in vitro* [J]. International Journal of Oral Science, 2012, 4(3): 146-151.
- [8] Wu J, Jahncke M L, Eifert J D, et al. Pomegranate peel (*Punica granatum*, L.) extract and Chinese gall (*galla chinensis*) extract inhibit *Vibrio parahaemolyticus* and *Listeria monocytogenes* on cooked shrimp and raw tuna [J]. Food Control, 2016, 59: 695-699.
- [9] Fang T, Bo L, Ji B, et al. Antioxidant and antimicrobial activities of consecutive extracts from *galla chinensis*: The polarity affects the bioactivities [J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 173-179.
- [10] Tian F, Li B, Ji B, et al. Antioxidant and antimicrobial activities of consecutive extracts from *Galla chinensis*: The polarity affects the bioactivities [J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 173-179.
- [11] Silva-Weiss A, Ihl M, Sobral P J A, et al. Natural additives in bioactive edible films and coatings: functionality and applications in foods [J]. Food Engineering Reviews, 2013, 5(4): 200-216.
- [12] Li X, Jiang F, Ni X, et al. Preparation and characterization of konjac glucomannan and ethyl cellulose blend films [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44: 229-236.
- [13] Xiao M, Wan L, Corke H, et al. Characterization of konjac glucomannan-ethyl cellulose film formation via microscopy [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 85: 434-441.
- [14] Ozsoy N, Can A, Yanardag R, et al. Antioxidant activity of *Smilax excelsa* L. leaf extracts [J]. Food Chemistry, 2008, 110(3): 571-583.
- [15] Krishnan K R, Babuskin S, Babu P A S, et al. Antimicrobial and antioxidant effects of spice extracts on the shelf life extension of raw chicken meat [J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 171: 32-40.
- [16] Re R, Pellegrini N, Proteggente A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay [J]. Free Radical Biology & Medicine, 1999, 26: 1231-1237.
- [17] Oke F, Aslim B, Ozturk S, et al. Essential oil composition, antimicrobial and antioxidant activities of *Satureja cuneifolia* Ten [J]. Food Chemistry, 2009, 112(4): 874-879.
- [18] 中华人民共和国卫生部. 中国国家标准化管理委员会. GB 4789.2-2010 食品微生物学检验菌落总数测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会. GB/T 9695.5-2008 肉与肉制品 pH 测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [20] 白艳红. 低温熏煮香肠腐败机理及生物抑菌研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2005: 2-29.