红茶菌菌膜的特性及应用

赵 育[1,2]， 苏 乔[1]， 张 悦[1]， 张宝善[1,2]

（1. 陕西师范大学 食品工程与营养科学学院，陕西 西安 710119；2. 陕西省果蔬深加工工程技术研究中心，陕西 西安 710119）

摘要： 红茶菌菌膜是漂浮在红茶菌饮料表面的由细菌和酵母菌在胞外形成的纤维素生物膜，具有高持水性、高机械强度、良好的热稳定性、生物相容性及可降解性等优良特性，因此在许多领域具有广阔的应用前景。作者综述了红茶菌菌膜中微生物的组成和共生关系、合成机制、红茶菌菌膜的结构和性质，以及红茶菌菌膜在食品、医疗、纺织和废水处理等领域的应用，并对红茶菌菌膜的未来应用进行了展望。

关键词： 红茶菌；菌膜；细菌纤维素

中图分类号：TS 202　**文章编号：**1673-1689(2024)02-0011-12　**DOI：**10.12441/spyswjs.20220303001

Progress on Characteristics and Applications of Kombucha Biofilm

ZHAO Yu[1,2]， *SU Qiao*[1]， *ZHANG Yue*[1]， *ZHANG Baoshan*[1,2]

（1. College of Food Engineering and Nutritional Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2.Research Center of Fruit and Vegetable Deep-Processing Technology, Xi'an 710119, China）

Abstract: Kombucha biofilm is a cellulose biofilm containing the symbiotic culture of bacteria and yeast, floating on the surface of kombucha beverages. Due to its properties of high water-holding capacity and mechanical strength, good thermal stability, biocompatibility, and degradability, it has a broad application prospect. The authors review the composition and symbiotic relationship of microorganisms in kombucha biofilms, the synthesis mechanism of bacteria cellulose, the structure and properties, and the applications in food technology, medical materials, textile industry, waste water treatment and other fields. The future research and applications of kombucha biofilm are also discussed.

Keywords: kombucha, biofilm, bacteria cellulose

红茶菌(kombucha)起源于我国，随后又传入日本、欧洲、北美等地。传统的红茶菌饮料是由红茶菌发酵制成的无乙醇或低乙醇饮料，酸甜爽口且具有独特的发酵味[1]。因其发酵液中含有机酸、茶多酚、葡萄糖醛酸等多种营养物质及有益微生物，具有抑菌、护肝、抗炎症、抗氧化、降血糖和预防癌症等保健功效，深受消费者的欢迎[2]。基于红茶菌饮料的保健功效和市场潜力，近年来，星巴克、可口可乐、百事等众多饮料行业巨头相继进军红茶菌领域，开发出多款以果蔬汁、中草药为原料，具有特殊风味和

收稿日期： 2022-03-03　**修回日期：** 2022-03-29

基金项目： 国家自然科学基金青年科学基金项目(31901657)；陕西省重点研发计划一般项目(2023-YBNY-195)。

* **作者简介：** 赵 育(1988—)，女，博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事食品发酵、食品微生物等研究。E-mail：yuzhao@snnu.edu.cn

保健功能的红茶菌饮料[3]。预计到 2025 年,国际红茶菌饮料的市场规模将达到 54 亿美元,市场前景可观[1]。

红茶菌菌膜,是漂浮在红茶菌饮料表面的一种含有细菌和酵母菌共生菌群 (symbiotic culture of bacteria and yeast,SCOBY)的生物膜。其中,红茶菌菌膜中细菌纤维素(bacteria cellulose,BC)的生产者为醋酸菌,而酵母菌产生的乙醇能刺激醋酸菌的生长,产生更多的细菌纤维素和乙酸[4]。由于细菌纤维素与植物纤维素分子组成相似, 并且具有无毒、高结晶度、高孔隙率、良好的生物相容性和生物可降解性等特点,使其在食品、生物医药、纺织、电子工业等方面均有广泛应用, 现已成为国际研究的热点。然而,在传统的红茶菌工业中,只有发酵液作为红茶菌饮料进行销售, 少量菌膜被用作发酵剂,其余的则直接被丢弃,造成资源的严重浪费。随着红茶菌饮料产业的飞速发展,红茶菌菌膜的开发和利用亟待开展。

随着现代生物学技术的快速发展,人们对红茶菌的认识和研究也逐步深入,这为红茶菌的产业化提供了理论依据。用 Web of Science 和 Scopus 两大数据库对 2012—2021 年这 10 年中有关红茶菌的关键词进行检索,发现关于红茶菌饮料产品开发及其生物活性成分的文献报道较多,关于红茶菌菌膜的相关报道较少,但关于菌膜特性及其应用的文献数量在逐年增加[5]。此外,目前关于红茶菌饮料的综述类文献较多,但鲜有针对红茶菌菌膜特性及应用的归纳总结。因此,作者就红茶菌菌膜的组成、合成机制、性能及其在食品、医用、纺织和废水处理等领域的应用研究进行总结,并对研究中存在的问题和今后红茶菌菌膜的发展趋势进行讨论,以期推动红茶菌菌膜的开发和利用,实现生物资源的最大化利用。

1 红茶菌菌膜的组成

1.1 红茶菌菌膜的形成

传统红茶菌的制备方法是在沸水中添加质量分数 0.5%~5.0%的红茶/绿茶和质量分数 5%~10%的蔗糖作为发酵底物,搅拌 5 min 后将茶叶过滤,当温度降至室温时,加入一定量发酵好的红茶菌菌液和/或菌膜进行发酵[6],制备方法见图 1。为保证微生物进行有氧呼吸,一般用布或者薄纱覆盖培养。一般情况下,室温发酵需要 7~14 d。在发酵的第 2~3 天,接种的红茶菌母体(mother layer)表面会形成新的菌膜 (daughter layer),14 d 后菌膜的厚度可达到 8~12 mm,颜色呈白色、浅黄色或浅棕色。菌膜如果太薄,说明可能被污染;如果太厚,则会阻止氧气进入,菌膜的合成也会缓慢停止。随着发酵时间的延长,由于质量增加,红茶菌菌膜可能会沉到容器底部。

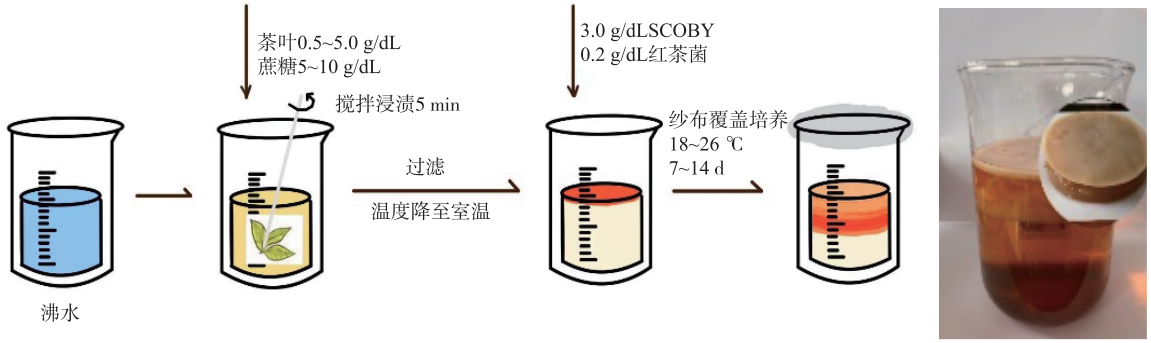


图 1 红茶菌菌膜的制备方法

Fig. 1 Preparation of kombucha biofilm

1.2 红茶菌菌膜的微生物组成

红茶菌菌膜中有大量的细菌和酵母菌,其显微镜照片见图 2[7],微生物组成见表 1。虽然菌膜中的微生物种类不如菌液中多样,但两者的优势菌群基本一致[8-9]。红茶菌菌膜中的细菌主要有醋酸杆菌属(*Acetobacter*)、葡糖醋杆菌属(*Gluconacetobacter*)、驹形杆菌属(*Komagataeibacter*)等,其中,驹形杆菌属中的木驹形杆菌(*Komagataeibacter xylinus*)是红茶菌菌膜的主要纤维素生产者,其在最初的微生物环境中占到 60%左右, 后期会增长至 70%左右[10]。乳酸菌在红茶菌菌膜中的含量较少,但 Seto 等发现将乳酸菌和葡糖醋杆菌属共生培养更有利于细菌

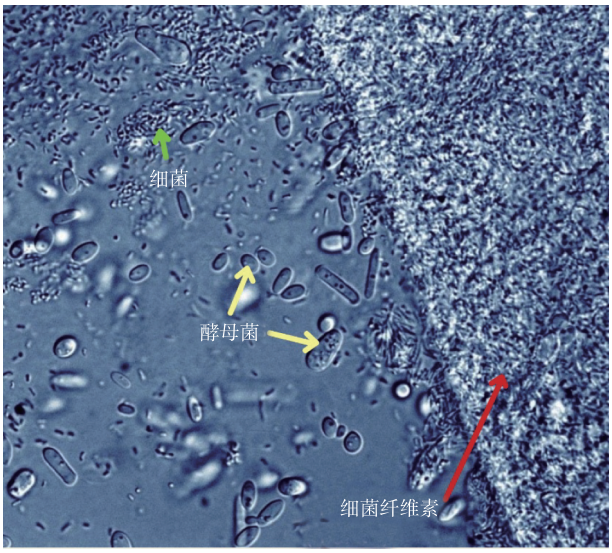


图 2　红茶菌菌膜的显微镜照片（×400）[7]

Fig. 2　A SCOBY of kombucha under the microscope (×400)[7]

纤维素的产生[11]。菌膜中的酵母主要有类酵母属（*Saccharomyces*）、假丝酵母属（*Candida*）、接合酵母属（*Zygosaccharomyces*）等[8-9,12-15]。Marsh 等通过高通量测序发现接合酵母属在菌膜与菌液中占 95%[9]。而 Chakravorty 等则发现假丝酵母属在菌膜中占到 73.5%~83.0%[8]。因此，不同的菌膜包含的微生物种类不相同，这可能与发酵底物、培养环境以及培养时间有关。此外，研究表明在发酵过程中，菌膜中的微生物也存在演替现象，但优势菌群几乎保持不变[8-9]。微生物种类在菌膜形成初期较多，后期逐渐减少，但丰度增加[10]。

1.3　红茶菌菌膜/纤维素的合成机制和影响因素

红茶菌中存在着复杂而多样的微生物种群，使得红茶菌纤维素比单一细菌形成的细菌纤维素更加复杂。相对于单一细菌，微生物种群使用红茶菌生产的纤维素的效率也有显著提高[26]，其代谢机理见图 3。酵母菌将蔗糖转化为果糖和葡萄糖，随后产生乙醇[27-28]。醋酸菌在葡糖氧化酶的作用下氧化产生乙酸、葡萄糖酸、葡萄糖醛酸等有机酸；而乙酸又刺激酵母菌产生更多乙醇，再经醋酸菌转化为乙酸。

表 1　红茶菌菌膜中的主要微生物组成

Table 1　Main microbial composition in the kombucha biofilm

界	属	种	参考文献
细菌	醋酸杆菌属	醋化醋杆菌	[13]
		固氮醋酸杆菌	[16]
		巴氏醋杆菌	[8]
		过氧化醋酸杆菌	[17]
	葡糖醋杆菌属	欧洲葡萄糖酸杆菌	[18]
		食糖葡萄糖乙酸杆菌	[19]
		中间葡糖醋杆菌	[18]
		液化葡糖醋杆菌	[18]
	葡糖杆菌属	氧化葡糖杆菌	[18,20]
		蜡状葡糖杆菌	[18]
	驹形杆菌属	莱迪亚驹形杆菌	[18]
		木驹形杆菌	[18]
		汉森驹形杆菌	[18]
	乳杆菌属	发酵乳杆菌	[21]
	明串珠菌属	酒明串珠菌	[18]
酵母	类酵母属	酿酒酵母	[8,18]
		路德氏酵母	[22]
	酵母菌	路德维希酵母菌	[19]
	覆膜孢酵母属	纤维酵母菌	[8]
	裂殖酵母属	粟酒裂殖酵母	[19]
	阿克苏酵母属	食腺嘌呤阿克苏酵母	[19]

续表 1

界	属	种	参考文献
酵母	酒香酵母属	拉比克酒香酵母	[19]
		克劳森酒香酵母	[19]
		卡斯特酒香酵母	[19]
	假丝酵母属	乳酒假丝酵母	[23]
		克鲁斯假丝酵母	[23]
		星形假丝酵母	[24]
		假丝酵母属亚种	[8]
		热带假丝酵母	[8]
		近平滑假丝酵母	[8]
	德巴利酵母	汉逊德巴利酵母	[8]
	德克酵母属	异性德克酵母	[18]
		布鲁塞尔德克酵母	[18]
	接合酵母属	拜氏接合酵母	[18]
	魏氏酵母亚属	加利福尼亚接合拟威尔酵母	[8]
	毕赤酵母属	发酵毕赤酵母	[25]
		墨西哥毕赤酵母	[8]

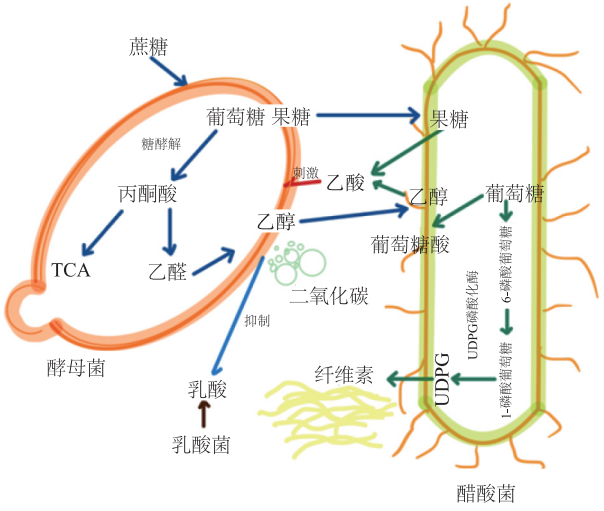


图 3 红茶菌菌膜中细菌与酵母菌的代谢过程

Fig. 3 Metabolic processes of bacteria and yeast in kombucha membrane

红茶菌中的微生物虽为共生菌群,但产生纤维素的却只有细菌,其中最主要的是醋酸杆菌属中的木醋杆菌(*Acetobacter xylinum*),后又被归类为木葡糖酸醋杆菌(*Gluconacetobacter xylinus*),最近又重新被分类为木驹形杆菌(*Komagataeibacter xylinus*),此菌也是阐述纤维素生物合成及调控机制的模式菌株[29-30]。研究表明,木驹形杆菌细菌纤维素的生物合成调控过程通过一系列酶介导进行。首先是葡萄糖转化成 6-磷酸葡萄糖,经葡萄糖磷酸变位酶催化后成为 1-磷酸葡萄糖,再在尿苷二磷酸(UDP)-葡萄糖焦磷酸化酶催化下形成尿苷二磷酸葡萄糖(UDPGlc),然后在多种细菌纤维素合成酶的催化下,每个单细胞每秒可以将多达 20 万个的 UDPGlc,聚合形成葡聚糖苷链[31]。原纤维的葡聚糖苷链直径为 2~4 nm,在细胞质外形成,通过气孔分泌到细菌细胞壁表面。木驹形杆菌细胞膜表面的显微照片表明,细胞表面存在 50~80 个气孔,它们将原纤维挤出形成纳米纤维,而这些纳米纤维再被组装形成大约 40~60 nm 的带状微纤维[32],见图 4[33]。

在红茶菌发酵初期,产生纤维素的细菌主要靠消耗溶液中的氧气来生长繁殖。当发酵液中溶氧量下降时只有在空气/液体界面中的细菌才可以维持其活性并产生表层的纤维素。随着发酵时间的推移,膜的厚度随之增加,形成悬浮结构。当发酵液中碳源减少,氧气供给不足时,红茶菌菌膜的合成就达到了极限[33]。相比于单一细菌合成的细菌纤维素膜,红茶菌菌膜合成形式的优势在于其中的细菌在适宜条件下生长迅速,并且能够利用发酵液中的各种碳源,包括蔗糖、葡萄糖、乙醇和甘油等多种底物生产纤维素。此外,红茶菌菌液中存在的咖啡因和黄嘌呤类物质也有助于通过激活纤维素相关酶来促进木驹形杆菌产生更多的纤维素[34-35];而酵母细胞死亡和自溶释放出的维生素和其他营养物质也可以促进细菌的生长繁殖,进而产生更多纤维素[8]。

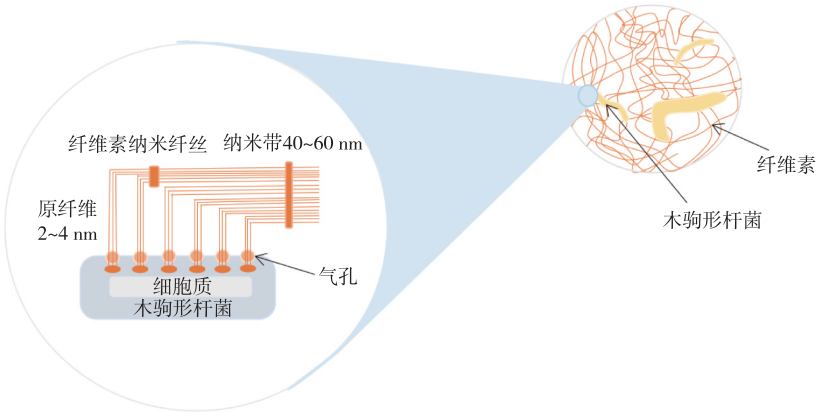


图 4　木驹形杆菌合成细菌纤维素的过程[33]

Fig. 4　Process of *Komagataeibacter xylinus* synthesizes bacterial cellulose[33]

因此，相较于单一细菌，红茶菌产生纤维素的过程更加高效、经济。

红茶菌菌膜的产量因红茶菌菌株、底物（碳源和氮源的含量）、发酵温度、发酵时间以及容器的尺寸、界面面积和溶液深度的不同而有所不同。Semjonovs 等研究发现，以葡萄糖为底物时，莱迪亚驹形杆菌（*Komagataeibacter rhaeticus*）P1463 和汉森驹形杆菌（*Komagataeibacter hansenii*）B22 合成的纤维素量显著高于木驹形杆菌（*Komagataeibacter xylinus*）DSM 6513T 和汉森驹形杆菌（*Komagataeibacter hansenii*）DSM 5602T 合成的纤维素量[23]；莱迪亚驹形杆菌（*Komagataeibacter rhaeticus*）P1463 在以葡萄糖、果糖和甘露醇为碳源时合成的纤维素量显著高于以蔗糖、半乳糖和核糖为碳源时合成的纤维素量。当以茶和蔗糖为底物发酵时，以绿茶为原料制备的红茶菌菌膜产量显著高于红茶和乌龙茶制备的菌膜产量[36]。当茶汁质量浓度低于 0.9 g/dL 时，随着茶汁质量浓度增加，菌膜生成量增加，但茶汁质量浓度高于 0.9 g/dL 后菌膜的生成量下降，这可能是由于茶多酚质量浓度的增加在一定程度上会抑制红茶菌中微生物的生长[37]；红茶菌菌膜的制备温度一般为 20~40 ℃，超过这个范围，红茶菌中微生物的生长受到抑制，生物量下降[38]；容器的尺寸、界面面积和溶液深度也影响着菌膜的产量。体积为 1 500 mL 和界面面积为 130.5 cm^2 的容器可生成 66 g/L 的菌膜，但当体积为 1 000 mL 时，界面面积大幅下降至 29.2 cm^2，纤维素膜的产量也迅速下降到 21.3 g/L[38]。当界面面积和液体深度相同，体积不同时，其菌膜的生成量相同。因此，界面面积/开口较大的容器有利于提高红茶菌菌膜的产量[39]。

2　红茶菌菌膜的结构和特性

红茶菌菌膜中的纤维素仅由细菌产生的纤维素组成，虽然细菌纤维素与植物纤维素分子组成相似，是以 *D*–葡萄糖为基本单元通过 β–1,4–糖苷键连接而成的高分子聚合物，但二者在物理、化学性质上有所不同。由细菌产生的微纤维（microfibril）的直径（0.01~0.10 μm）比植物纤维（10 μm）小 2~3 个数量级[36]。细菌纤维素无分支，且仅由纤维素组成。相反，植物纤维素有分支，并且由半纤维素、木质素、果胶等物质组成，因此植物纤维素的纯化需要经过更复杂的化学处理。与植物纤维相比，细菌纤维素有更强的吸水性和更好的机械伸展性，还有多孔、高结晶度、生物相容、无毒等性能，使得细菌纤维素成为生物材料、生物能源、食品强化和包装技术等方面的首选材料[31,40]。

2.1　高透气性、高持水性、高热稳定性和高结晶度

在扫描电子显微镜（SEM）下观察红茶菌菌膜/纤维素为三维网状结构，中间有很多孔隙，纤维素与细菌、酵母菌交联在一起，使得形成的红茶菌菌膜具有持水性。傅里叶变换红外光谱（FTIR）分析发现红茶菌纤维素中存在氢键连接的羟基，而由于氢键的存在，红茶菌纤维素的持水力可以达到 88.42%，使得它能吸收的水分是其自身干质量的 60~700 倍，并且可重复干燥[41-42]。未经干燥的细菌纤维素持水能力高达 1 000%，冷冻干燥后其持水能力仍超过 600%，而植物纤维素仅为 60%，因此红茶菌菌膜能够成为良好的吸水材料[43]。

通过对红茶菌发酵生成的纤维素菌膜进行热质量分析，发现红茶菌纤维素具有较高的热稳定性,在 298.7 ℃才开始降解。此外,X 射线衍射分析结果表明红茶菌纤维素的结晶度为 80.21%,高于天然植物纤维[44-45]。

2.2 良好的生物降解性、生物相容性和弹性

红茶菌菌膜中的纤维素纯度高,可被纤维素酶降解,也可在自然环境中直接降解,不会造成环境污染[46]。此外,细菌纤维素具有良好的生物相容性。例如,王宗良等将细菌纤维素膜分别与成纤维细胞和软骨细胞进行复合培养,并将形成的复合物进行裸鼠皮下移植实验,结果显示,移植的复合物很好地融入了裸鼠正常皮肤,成纤维细胞和软骨细胞增殖明显[46]。细菌纤维素中存在着大量氢键,使得其杨氏模量测量值高达 15 GPa,抗撕拉能力是同样厚度的聚乙烯和聚氯乙烯膜的 6 倍。Andrade 等证明细菌纤维素膜比人类的动脉和静脉更有弹性[47]。这些性能满足了其作为新型医用组织器官、医用敷料等产品的基本要求。

2.3 抗菌性

红茶菌饮料具有一定的抗菌活性,主要是由于其中含有丰富的有机酸(乙酸、葡萄糖酸、葡萄糖醛酸等)、茶多酚和细菌素等。同样的,干燥的红茶菌菌膜也被认为会被一些致病菌抑制，如大肠杆菌(*Escherichia coli*)、金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)、粪肠球菌(*Enterococcus faecalis*)甚至耐甲氧西林葡萄球菌 (Methicillin –resistant *Staphylococci*)等,这为生产具有抗菌活性的辅料或医疗设备(如绷带、口罩)提供了理论依据[48]。

3 红茶菌菌膜的应用

基于其特性,红茶菌菌膜可以从一个基本没有附加价值的副产物/废弃物转变为一个具有开发潜力的原材料。但迄今为止,红茶菌菌膜的利用率仍然较低,关于红茶菌菌膜的应用和新产品开发的研究仍然很有限。根据其性质不同,红茶菌菌膜一般用于食品、医药、纺织和废水处理等领域。

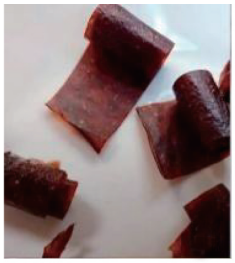
3.1 食品领域

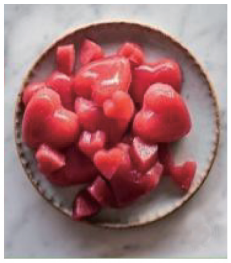
红茶菌菌膜通常作为发酵剂应用到新的红茶菌饮料的生产中。近年来,随着红茶菌饮料越来越受消费者欢迎,基于红茶菌饮料的保健优势、市场潜力与消费者日渐增长的多元化需求,越来越多的研究人员在积极开发和创新红茶菌饮料的原料和工艺,如利用红茶菌菌膜发酵果汁、蔬菜汁和中草药的浸提液等新型红茶菌饮料。Watawana 等用红茶菌菌膜直接发酵椰子汁 7 d，得到的饮料不仅具有椰子的典型香气,其总酚质量浓度和抗氧化活性也显著提高[49];该饮料可抑制 α–葡萄糖苷酶的活性,从而抑制葡萄糖的水解,降低人体生理系统中葡萄糖的质量浓度,更有利于控制消费者的血糖。Loncar 等利用红茶菌菌膜发酵菊芋(洋姜)提取物,发酵液中含有丰富的低聚果糖和果糖,能促进肠内双歧杆菌的增殖[50],可作为膳食补充剂。Zhang 等用红茶菌菌膜分别发酵玫瑰花浸提液和酸枣仁浸提液的混合液,发酵后溶液的口感(酸味和苦味)更佳,总酚和总黄酮含量显著提高[51],同时,发酵液中 2 种典型的镇静催眠物质,6–阿魏酰斯皮诺素和棘甙的含量较发酵前显著提高,可得到药效更显著的红茶菌饮料。此外，饮料中的重金属会危害公众健康,Najafpour 等研究发现,红茶菌菌膜对重金属具有良好的吸附效果,对于 500 mL 的饮料来说,当红茶菌菌膜的初始用量 35.85 g、茶叶 4.43 g、蔗糖18.42 mg/L、水中钙和镁离子质量浓度 0.0 mg/L 时，对液体中 Hg^{2+}、As^{3+}、Pb^{2+}、Cd^{2+}和 Cr^{6+}的去除效率分别为 93.3%、76.7%、76.1%、84.3%和 75.4%[52]。因此,红茶菌菌膜对重金属的吸附作用能够保证红茶菌饮料的安全性,并可进一步应用于其他饮料的安全生产。

红茶菌菌膜含有丰富的膳食纤维，呈肉质感,并具有醋酸、乳酸等特殊风味,还可以作为食品直接或加工后食用(见图 5),如将菌膜切丝凉拌,做成类似于凉皮的小吃,或制成汉堡中的“肉”饼、“肉”丸、“肉”干,或糖果、咀嚼片和软糖,受到很多素食者的欢迎。

红茶菌菌膜可以作为一种良好的饲料添加剂。红茶菌菌膜中含有蛋白质、氨基酸、粗纤维、钙、磷等多种营养物质,将红茶菌菌膜晒干后,其植酸酶的活性为 2.3×10^4 IU/g(以蛋白质质量计),将晒干的菌膜粉加入肉鸡的饲料中,可以提高肉鸡对饲料和水分的进食率,进而增加肉鸡的质量,同时,加入的红茶菌菌膜对肉鸡的肝功能没有损害,是一种安全的添加剂[55]。

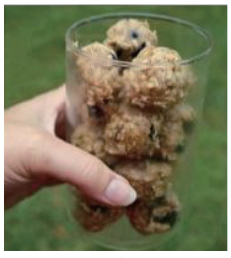
此外,红茶菌菌膜因具有良好的透气性、弹性和可降解性,也可以代替塑料成为食品的包装保鲜


（a）咀嚼片


（b）软糖


（c）“面”条和“面”汤[53]


（d）肉干


（e）肉丸[54]

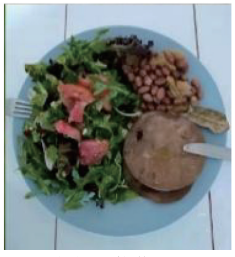

（f）红茶菌汉堡

图 5　红茶菌菌膜制成的各类食品

Fig. 5　Foods made from kombucha biofilm

材料。Aduri 等研究出了一种用红茶菌菌膜制作的环境友好型购物袋[56]，这种袋子具有良好的折叠性和保鲜性能，将蔬菜放到菌膜包装袋中在冰箱中保存，8 d 之后蔬菜依旧新鲜，营养物质几乎没有损失。但由于菌膜干燥后容易脆裂，需要喷涂橄榄油或蜂蜡。此外，红茶菌菌膜具有多孔性，水分不能透过，干燥后具有一定的吸湿性，不适于盛放牛奶或其他饮料[56]；Sharma 等以番茄为研究对象，发现红茶菌菌膜可以将番茄的保鲜期延至 28 d[57]。

3.2　医用敷料领域

红茶菌菌膜具有独特的纤维网状结构、高弹性模量和良好的生物相容性等特性，是一种制备医用组织的优良候选材料。Zhu 等研究发现，在红茶菌菌膜上培养的施万细胞（Schwann cells）和在玻片上培养的细胞无形态和细胞功能上的显著差异[58]。随后，研究人员首次用红茶菌菌膜和不锈钢内芯制成神经导管，浸泡处理后作为体外培养施万细胞的支架，再沿坐骨神经植入大鼠肌间隙；植入 42 d 内，植入大鼠与假手术组大鼠在血细胞计数、血清生化参数、组织反应上均无显著性差异。因此认为红茶菌菌膜与施万细胞具有良好的生物相容性，且没有血液学和组织学负面作用。

由于红茶菌菌膜/纤维素膜具有高透气性、高持水性、高结晶度、抑菌性和良好的生物相容性等性质，其在医用敷料产业也具有广阔的应用前景。在细菌纤维素膜合成的过程中，若向培养基中添加外源材料，会在纳米纤维组装过程中产生干扰，最终产生具有新性能的新型纤维素膜。例如，红茶菌菌膜本身具有一定的抗菌特性，加入 5 mmol/L 的硝酸银溶液，形成的纳米阴离子（AgNPs）能够高效抑制金黄色葡萄球菌和大肠杆菌，且对人乳腺癌细胞（MCF-7）具有良好的抗癌特性[59]；将红茶菌纤维素浸泡在咖啡粉浸提液（含有 2.732 g/L 酚类化合物）中，得到的生物复合材料抑菌特性增强，并可通过吸收多余的渗出物来保护受伤区域，有望成为伤口愈合的首选材料[60]；将红茶菌菌膜浸泡在具有抗菌活性的散沫花（*Lawsonia inermis*）浸提液中 24 h 后干燥，含有散沫花生物活性成分的红茶菌菌膜具有更强的抑菌活性，且小鼠成纤维细胞（L929）的伤口愈合率提高至 90%[61]。因此，经过修饰和功能化后的红茶菌纤维素膜的特性可以得到进一步加强和扩展，用于绷带、纱布和创可贴等的制作。

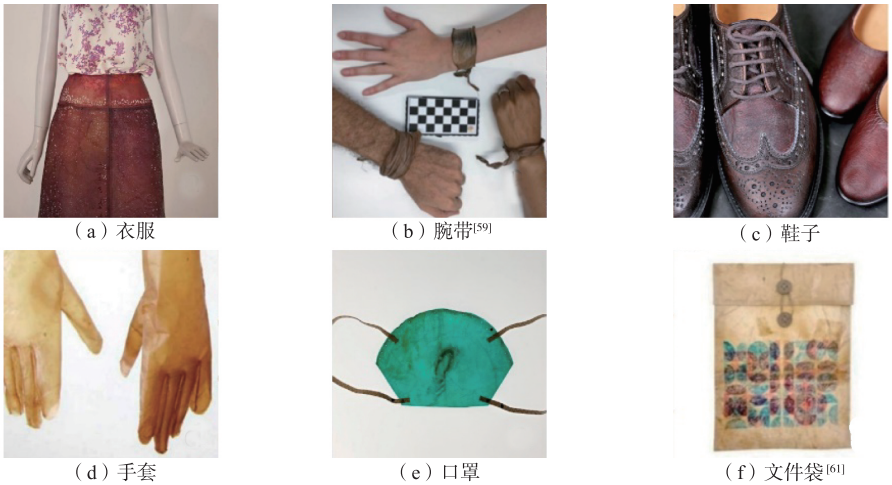
3.3　纺织领域

天然纤维和人造纤维是纺织服装行业的主要原材料，但人造纤维在加工和生产的过程会造成环境污染。其中，人造纤维的可降解性较差，处理方式不当还会加剧环境的恶化。因此，“绿色”环保纤维的开发与应用得到了纺织研究领域的重视。红茶菌菌膜中的纤维素分子结构类似于植物纤维素，并且具有优于丝、麻、棉等传统纤维的高拉伸强度、高孔隙率和良好的生物降解性等独特的性质，同时呈现皮革一样的质感、色泽和机理，因此可制备出性能

更优的“绿色”纺织品以及替代动物皮革的“可持续”皮革。

近年来,红茶菌菌膜被一些环保设计师小规模制作成衣服、腕带、鞋子、手套、口罩和包等多种风格各异的绿色纺织品,见图 6。设计师 Suzan Lee 还推出了以红茶菌菌膜为材料的高级时装定制项目。Kaminski 等也致力于提高红茶菌菌膜的纺织性能[62],其将干燥后的红茶菌菌膜浸泡在甘油水溶液(质量分数 6% 或 12%)中,使红茶菌纤维素形成水凝胶结构,冻干后的菌膜具有较高的弹性和机械性能,并且防火、耐高温。这些改性的材料被制作成腕带和 T 恤,具有较高的舒适性和耐用性。

由于红茶菌菌膜的吸水性极佳,因此极易染色。一些爱好者利用铁氧化的方法对其进行色彩加工,或用蔬菜、水果的天然色素快速地染出绚丽的颜色。然而红茶菌菌膜会从空气中或者人体表面吸湿,致使纺织品变重、变厚,成为其作为纺织材料的一大缺点[63]。为了解决这一问题,研究人员采用各种化学方法共价官能化红茶菌纤维素的表面,使其表面疏水。例如,可以将硬脂酸乙醇溶液(2.5 g/dL)涂抹在干燥后的红茶菌菌膜表面,然后用热空气流(70~75 ℃)处理该材料以去除乙醇和硬脂酸,起到疏水的效果[62];也可利用金纳米颗粒(AuNP)、银纳米颗粒(AgNP)和氧化石墨烯来处理红茶菌衍生的细菌纤维素,通过不同纳米颗粒来堵塞纤维素孔隙,并通过不同纳米材料的协同非共价相互作用改变其表面特性,增加表面粗糙度,从而增加其疏水性,此外,改性后的材料具有较高的抗菌活性和较高的抗弯曲性,更有希望成为天然皮革的替代品[63]。



(a)衣服 (b)腕带[59] (c)鞋子
(d)手套 (e)口罩 (f)文件袋[61]

图 6 红茶菌菌膜应用于服装纺织的示例

Fig. 6 Clothing textile made from kombucha biofilm

3.4 废水处理领域

基于红茶菌菌膜多孔、比表面积高和金属结合活性位点多的特点,红茶菌菌膜具有良好的金属吸附能力。在 pH 分别为 2.0 和 4.0、接触时间分别为 60 min 和 120 min 的情况下,红茶菌菌膜对铬离子(Cr^{6+})和铜离子(Cu^{2+})最大吸附量分别为 74.2%和 58.0%[65];红茶菌菌膜还被用于去除废水中的砷离子(As^{5+})。根据兰格缪尔吸附模型分析发现,用氯化铁对红茶菌菌膜进行预处理可以将红茶菌菌膜的吸附量提高至 3.98×10^{-3} mmol/g[66];当 pH 为 5.0,温度为 50 ℃时,红茶菌菌膜对合成废水中铅离子(Pb^{2+})的吸附效率为 99.7%,比高效的吸附剂氧化石墨烯/Fe_3O_4 纳米颗粒的吸附效率(98.08%)略高[67];当 pH 为 7,接触时间为 15 min,温度为 25 ℃时,红茶菌菌膜可以去除废水中 94.5% 的镍离子(Ni^{2+}),此外,平衡实验与兰格缪尔吸附模型拟合良好,25 ℃时红茶菌菌膜对 Ni^{2+}的吸附量可以达到 454.54 mg/g[68]。因此,红茶菌菌膜在废水处理领域具有良好的应用潜力。

3.5 其他应用

红茶菌菌膜也被用于家居设计中。红茶菌菌膜对高温稳定,可生物降解,使得用红茶菌菌膜制成的台灯更耐热、更安全、更环保(见图 7(a)),但由于红茶菌菌膜通常生长在容器的顶部,很难按设计的形状定型[69]。

红茶菌菌膜具有较强的抗张强度、弹性模量和聚合能力，可以被直接或间接地用来造纸（见图 7（b））。将红茶菌菌膜破碎均匀后与办公室回收的废纸浆混合，其纤维素分子链上的羟基暴露，极易与废纸浆中的植物纤维形成氢键，因此可以填补废纸纤维间的薄空隙，降低纸张的撕裂指数，增强纸张的机械强度以提高废纸回收后的纸张质量[70]。



（a）台灯[69]　　（b）纸张[70]

图 7　红茶菌菌膜其他应用实例

Fig. 7　Other applications of kombucha biofilm

红茶菌菌膜也被用于电化学研究与应用中。Kalaiappan 等利用红茶菌菌膜中的碳和氧化石墨烯作为碳宿主基质，与硫和聚丙烯腈一起被制成一种复合材料，用作锂硫电池的阴极，该阴极的初始放电容量为 1 652 mAh/g，第 100 次循环容量为 1 193 mAh/g，具有较高的容量和良好的循环稳定性[71]。栾玉婷等以红茶菌菌膜为碳源制备碳材料，通过对其进行预碳化、活化及再煅烧，在其内部、外部形成大量孔洞结构，再结合红茶菌菌膜自身的网状结构，使之更加适合离子的运输与传递，更适合作为电极材料[72]。研制的碳材料具有较好的电容性，每克材料电容值可达到 167 F，并具有良好的稳定性。

4 展　望

红茶菌菌膜是漂浮在红茶菌饮料表面由细菌和酵母菌在胞外形成的生物膜，经常作为副产物被丢弃。红茶菌中的细菌纤维素与植物纤维素分子组成相似，其菌膜具有纳米级网状结构、多孔、透气、持水、易吸附、高弹性、高热稳定性、强抗菌、生物相容性良好、可降解等特点，因此红茶菌菌膜亟待开发。

红茶菌菌膜具有细菌纤维素的多种特性，因此在食品、医疗、纺织、废水处理和电子工业等方面均有广泛的应用前景，近几年已成为国际研究的热点。但迄今为止，对红茶菌菌膜的研究主要集中在菌膜的微生物互作、纤维素的形成机理和基本性质等方向，对红茶菌菌膜的产品开发和应用的研究尚处于初级阶段。究其根本，主要还是红茶菌菌膜的发酵成本较高、产量较低、周期较长。因此，在不影响产品质量和产量的情况下，可以通过使用可替代的、廉价的糖源，使用廉价的茶叶，如作者所在团队正在使用夏秋茶进行红茶菌的发酵，或减少发酵生产的所需空间等以降低原料的成本；通过筛选稳定高产菌膜/纤维素的菌种，优化发酵原料、条件等提高红茶菌生物膜的产量；通过调控红茶菌菌群对纤维素的合成速度以缩短发酵周期。

红茶菌菌膜的应用和开发主要是基于细菌纤维素的应用。自细菌纤维素被发现以来，其合成机制、理化特征及其在食品、医药、纺织、电化学、环保、时尚和化妆品等方面的应用得到了广泛报道。而红茶菌菌膜/纤维素的生产与单一细菌生产的纤维素相较更经济和更易培养，由于红茶菌菌膜是红茶菌饮料生产的副产物，其应用也更符合绿色环保、可持续发展的理念，因此，红茶菌菌膜有望作为传统细菌纤维素的替代品，发挥更广泛的作用。

参考文献：

[1] KIM J，ADHIKARI K. Current trends in kombucha：marketing perspectives and the need for improved sensory research [J]. **Beverages**，2020，6(1)：15.

[2] MARTÍNEZ LEAL J，VALENZUELA S L，JAYABALAN R，et al. A review on health benefits of kombucha nutritional compounds and metabolites[J]. **CyTA – Journal of Food**，2018，16(1)：390-399.

[3] 檀馨悦，黎琪，王晴，等. 红茶菌中风味物质相关功能微生物的研究进展[J]. 食品科学，2020，41(11)：327-335.
TAN X Y，LI Q，WANG Q，et al. Progresses in functional microorganisms associated with flavor compounds in kombucha tea[J]. **Food Science**，2020，41(11)：327-335.（in Chinese）

[4] LIU C H，HSU W H，LEE F L，et al. The isolation and identification of microbes from a fermented tea beverage，Haipao，and their interactions during Haipao fermentation[J]. **Food Microbiology**，1996，13(6)：407-415.

[5] ANTOLAK H，PIECHOTA D，KUCHARSKA A. Kombucha tea-a double power of bioactive compounds from tea and symbiotic

culture of bacteria and yeasts (SCOBY)[J]. **Antioxidants**, 2021, 10(10): 1541.
[6] COELHO R M D, DE ALMEIDA A L, DO AMARAL R Q G, et al. Kombucha: review[J]. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, 2020, 22: 100272.
[7] BENJAMIN WOLFE. Microbial diversity of komucha[EB/OL]. (2014-07-29)[2022-03-01]. https://microbialfoods.org/science-digested-microbial-diversity-kombucha/.
[8] CHAKRAVORTY S, BHATTACHARYA S, CHATZINOTAS A, et al. Kombucha tea fermentation: microbial and biochemical dynamics[J]. **International Journal of Food Microbiology**, 2016, 220: 63-72.
[9] MARSH A J, O'SULLIVAN O, HILL C, et al. Sequence-based analysis of the bacterial and fungal compositions of multiple kombucha (tea fungus) samples[J]. **Food Microbiology**, 2014, 38: 171-178.
[10] ST-PIERRE D L. Microbial diversity of the symbiotic colony of bacteria and yeast (SCOBY) and its impact on the organoleptic properties of kombucha[D]. Maine, USA: The University of Maine, 2019.
[11] SETO A, SAITO Y, MATSUSHIGE M, et al. Effective cellulose production by a coculture of *Gluconacetobacter xylinus* and *Lactobacillus* Mali[J]. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 2006, 73(4): 915-921.
[12] DUFRESNE C J, FARNWORTH E R. A review of latest research findings on the health promotion properties of tea[J]. **The Journal of Nutritional Biochemistry**, 2001, 12(7): 404-421.
[13] 蒋立文. 红茶菌优势微生物的分离、鉴定及抗菌机理的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
[14] 张虎成, 张征田, 辛秀兰. 红茶菌中微生物的分离与初步鉴定[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2011, 25(2): 42-46.
ZHANG H C, ZHANG Z T, XIN X L. Isolation and identification of microorganisms from kombucha fungus culture[J]. **Journal of Beijing Union University (Natural Sciences)**, 2011, 25(2): 42-46. (in Chinese)
[15] NEERA, RAMANA K V, BATRA H V. Occurrence of cellulose-producing *Gluconacetobacter* spp. in fruit samples and kombucha tea, and production of the biopolymer[J]. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, 2015, 176(4): 1162-1173.
[16] 徐伟, 葛阳阳, 陈翠婷, 等. 基于宏基因组技术分析传统红茶菌中菌群组成及其主要代谢通路[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 119-123.
XU W, GE Y Y, CHEN C T, et al. Microorganism composition and main metabolic pathways analysis of traditional Kombucha by metagenomic technology[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2018, 39(5): 119-123. (in Chinese)
[17] 梅瀚杰, 胡文锋. 国内外红茶菌研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 335-341.
MEI H J, HU W F. Research progress of kombucha study in the world[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2018, 39(17): 335-341. (in Chinese)
[18] COTON M, PAWTOWSKI A, TAMINIAU B, et al. Unraveling microbial ecology of industrial-scale Kombucha fermentations by metabarcoding and culture-based methods[J]. **FEMS Microbiology Ecology**, 2017, 93(5): 48.
[19] SINIR G Ö, TAMER C E, SUNA S. Fermented Beverages[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019: 401-432.
[20] REVA O N, ZAETS I E, OVCHARENKO L P, et al. Metabarcoding of the kombucha microbial community grown in different microenvironments[J]. **AMB Express**, 2015, 5(1): 124.
[21] YU-CHENG SUI Z J Z, WU H W, ZHOU C B, et al. Flavour chemical dynamics during fermentation of kombucha tea[J]. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, 2018: 732.
[22] 张妍, 徐伟, 傅徐阳. 红茶菌产细菌纤维素菌种分离与初步鉴定[J]. 食品工业, 2012, 33(10): 123-125.
ZHANG Y, XU W, FU X Y. Isolation and identification of microbes from kombucha producing bacterial cellulose[J]. **The Food Industry**, 2012, 33(10): 123-125. (in Chinese)
[23] SEMJONOVS P, RUKLISHA M, PAEGLE L, et al. Cellulose synthesis by *Komagataeibacter rhaeticus* strain P1463 isolated from Kombucha[J]. **Applied Microbiology and Biotechnology**, 2017, 101(3): 1003-1012.
[24] TEOH A L, HEARD G, COX J. Yeast ecology of Kombucha fermentation[J]. **International Journal of Food Microbiology**, 2004, 95(2): 119-126.
[25] 邱卫华. 红茶菌微生物群落多样性及其分析方法的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 311-317.
QIU W H. Research advances on microbial diversity and its analytical methods of kombucha[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2019, 40(24): 311-317. (in Chinese)
[26] 唐水佳, 杨雪霞, 洪枫. 红茶菌制备细菌纤维素的研究[J]. 纤维素科学与技术, 2012, 20(2): 40-45.
TANG S J, YANG X X, HONG F. Production of bacterial cellulose by kombucha[J]. **Journal of Cellulose Science and Technology**, 2012, 20(2): 40-45. (in Chinese)

[27] SIEVERS M，LANINI C，WEBER A，et al. Microbiology and fermentation balance in a kombucha beverage obtained from a tea fungus fermentation[J]. **Systematic and Applied Microbiology**，1995，18(4)：590-594.
[28] REISS J. Influence of different sugars on the metabolism of the tea fungus[J]. **Zeitschrift Für Lebensmittel–Untersuchung Und –Forschung**，1994，198(3)：258-261.
[29] RÖMLING U，GALPERIN M Y. Bacterial cellulose biosynthesis：diversity of operons，subunits，products，and functions [J]. **Trends in Microbiology**，2015，23(9)：545-557.
[30] YAMADA Y，YUKPHAN P，LAN V H T，et al. Description of *Komagataeibacter* gen. nov.，with proposals of new combinations (Acetobacteraceae)[J]. **The Journal of General and Applied Microbiology**，2012，58(5)：397-404.
[31] CHAWLA P R，BAJAJ I B，SURVASE S A，et al. Microbial cellulose：fermentative production and applications [J]. **Food Technology and Biotechnology**，2009，47(2)：107-124.
[32] IGUCHI M，YAMANAKA S，BUDHIONO A. Bacterial cellulose—a masterpiece of nature's arts [J]. **Journal of Materials Science**，2000，35(2)：261-270.
[33] ESA F，TASIRIN S M，RAHMAN N A. Overview of bacterial cellulose production and application [J]. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**，2014，2：113-119.
[34] BALENTINE D A，WISEMAN S A，BOUWENS L C. The chemistry of tea flavonoids[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**，1997，37(8)：693-704.
[35] FONTANA J D，FRANCO V C，DE SOUZA S J，et al. Nature of plant stimulators in the production of *Acetobacter xylinum* ("tea fungus") biofilm used in skin therapy[J]. **Applied Biochemistry and Biotechnology**，1991，28/29：341-351.
[36] GARGEY I A，INDIRA D，JAYABALAN R，et al. Green Buildings and Sustainable Engineering[M]. Singapore：Springer，2019：337-346.
[37] 王荣荣，王家东. 不同茶汁浓度对红茶菌发酵夏秋茶过程中菌膜和茶多酚的影响研究[J]. 信阳农林学院学报，2015，25(2)：104-106.
WANG R R，WANG J D. Study on effects of different tea-brothe concentration on mycoderm production and tea-polyphenols in the process of fermentation of kombucha[J]. **Journal of Xinyang College of Agriculture and Forestry**，2015，25(2)：104-106. (in Chinese)
[38] GOH W N，ROSMA A，KAUR B，et al. Fermentation of black tea broth (kombucha)：I. effects of sucrose concentration and fermentation time on the yield of microbial cellulose[J]. **International Food Research Journal**，2012，19(1)：109-117.
[39] VILLARREAL-SOTO S A，BEAUFORT S，BOUAJILA J，et al. Impact of fermentation conditions on the production of bioactive compounds with anticancer，anti-inflammatory and antioxidant properties in kombucha tea extracts[J]. **Process Biochemistry**，2019，83：44-54.
[40]GAYATHRY G，GOPALASWAMY G. Production and characterisation of microbial cellulosic fibre from *Acetobacter xylinum*[J]. **Indian Journal of Fibre & Textile Research**，2014，39(1)：93-96.
[41] 朱忠顺. 细菌纤维素的发酵生产及其对重金属离子的吸附作用[D]. 开封：河南大学，2017.
[42] SHARMA C，BHARDWAJ N K. Biotransformation of fermented black tea into bacterial nanocellulose via symbiotic interplay of microorganisms[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**，2019，132：166-177.
[43] KLEMM D，SCHUMANN D，UDHARDT U，et al. Bacterial synthesized cellulose—artificial blood vessels for microsurgery[J]. **Progress in Polymer Science**，2001，26(9)：1561-1603.
[44] 张沙沙，卢蔚波，张婷，等. 红茶菌生产细菌纤维素及其结构表征[J]. 浙江科技学院学报，2018，30(6)：445-450.
ZHANG S S，LU W B，ZHANG T，et al. Production and structure characterization of bacterial cellulose with black tea fungus[J]. **Journal of Zhejiang University of Science and Technology**，2018，30(6)：445-450. (in Chinese)
[45] YILDIRIM N，SHALER S. A study on thermal and nanomechanical performance of cellulose nanomaterials (CNs)[J]. **Materials**，2017，10(7)：718.
[46] 王宗良，贾原媛，石毅，等. 纳米细菌纤维素膜的表征与生物相容性研究[J]. 高等学校化学学报，2009，30(8)：1553-1558.
WANG Z L，JIA Y Y，SHI Y，et al. Research on characterization and biocompatibility of nano-bacterial cellulose membrane[J]. **Chemical Journal of Chinese Universities**，2009，30(8)：1553-1558. (in Chinese)
[47] ANDRADE F，ALEXANDRE N，AMORIM I，et al. Studies on the biocompatibility of bacterial cellulose [J]. **Journal of Bioactive and Compatible Polymers**，2013，28：97-112.
[48] MATEI B，DIGUTA C F，MATEI F，et al. Antimicrobial potential of kombucha bacterial biopolimer [J]. **Scientific Bulletin**

(Series F. Biotechnologies), 2020, 24: 2285-1364.
[49] WATAWANA M I, JAYAWARDENA N, GUNAWARDHANA C B, et al. Enhancement of the antioxidant and starch hydrolase inhibitory activities of king coconut water (*Cocos nucifera* var. *aurantiaca*) by fermentation with kombucha 'tea fungus' [J]. **International Journal of Food Science & Technology**, 2016, 51(2): 490-498.
[50] LONCAR E, MALBASA R V, KOLAROV L. Kombucha fermentation on raw extracts of different cultivars of Jerusalem artichoke[J]. **Acta Periodica Technologica**, 2007(38): 37-44.
[51] ZHANG S, CHENG M Q, LI Z D, et al. Composition and biological activity of rose and jujube kernel after fermentation with kombucha SCOBY[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2020, 44(10): e14758.
[52] NAJAFPOUR A, RAJABI KHORRAMI A, ABEROOMAND A P, et al. Study of heavy metals biosorption by tea fungus in Kombucha drink using central composite design[J]. **Journal of Food Composition and Analysis**, 2020, 86: 103359.
[53] Konbucha Noodle Soup[EB/OL]. [2022-03-01]. https://tiger-corporation-us. com/kombucha-noodle-soup/.
[54] DONNA S. SCOBY Energy Balls[EB/OL]. [2022-03-01]. https://www. pinterest. com/pin/270497521349281715/.
[55] MURUGESAN G S, SATHISHKUMAR M, SWAMINATHAN K. Supplementation of waste tea fungal biomass as a dietary ingredient for broiler chicks[J]. **Bioresource Technology**, 2005, 96(16): 1743-1748.
[56] DURI P, RAO K A, FATIMA A, et al. Study of biodegradable packaging material produced from SCOBY [J]. **Research Journal of Life Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences**, 2019, 5(3): 389-404.
[57] SHARMA C, BHARDWAJ N K, PATHAK P. Static intermittent fed-batch production of bacterial nanocellulose from black tea and its modification using chitosan to develop antibacterial green packaging material[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2021, 279: 123608.
[58] ZHU C L, LI F, ZHOU X Y, et al. Kombucha-synthesized bacterial cellulose: preparation, characterization, and biocompatibility evaluation[J]. **Journal of Biomedical Materials Research(Part A)**, 2014, 102(5): 1548-1557.
[59] NT N. Kombucha fungus mediated silver nanoparticles and their biological activities [J]. **International Journal on Applied Bioengineering**, 2017, 11(2): 22-26.
[60] EL-WAKIL N A, HASSAN E A, HASSAN M L, et al. Bacterial cellulose/phytochemical's extracts biocomposites for potential active wound dressings[J]. **Environmental Science and Pollution Research International**, 2019, 26(26): 26529-26541.
[61] POOJA R, VADODARIA K, VIDHYA S. Synthesis of bacterial cellulose and herbal extract for the development of wound dressing[J]. **Materials Today: Proceedings**, 2019, 15: 284-293.
[62] KAMINSKI K, JAROSZ M, GRUDZIEN J, et al. Hydrogel bacterial cellulose: a path to improved materials for new eco-friendly textiles[J]. **Cellulose**, 2020, 27(9): 5353-5365.
[63] AYYAPPAN V G, VHATKAR S S, BOSE S, et al. Incorporations of gold, silver and carbon nanomaterials to kombucha-derived bacterial cellulose: development of antibacterial leather-like materials [J]. **Journal of the Indian Chemical Society**, 2022, 99(1): 100278.
[64] 赵雪薇. 天然生物材料作为 DIY 材料的可能性与应用研究: 以红茶菌为例[D]. 北京: 中央美术学院, 2020.
[65] RAZMOVSKI R, SCIBAN M. Biosorption of Cr(VI) and Cu(II) by waste tea fungal biomass [J]. **Ecological Engineering**, 2008, 34(2): 179-186.
[66] SAHEBEI S M, REZA J K G, NASERI S, et al. Removal of arsenic from an aqueous solution by pretreated waste tea fungal biomass[J]. **Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering**, 2007, 4: 85-92.
[67] MOUSAVI S, HASHEMI S, AMANI A, et al. Pb (II) removal from synthetic wastewater using kombucha scoby and graphene oxide/Fe_3O_4[J]. **Physical Chemistry Research**, 2018, 6: 759-771.
[68] MOUSAVI S M, HASHEMI S A, BABAPOOR A, et al. Separation of Ni(II) from industrial wastewater by kombucha scoby as a colony consisted from bacteria and yeast: kinetic and equilibrium studies[J]. **Acta Chimica Slovenica**, 2019, 66(4): 865-873.
[69] FAIDI M. Feasability of Bacterial Cellulose in Furniture Design[EB/OL]. (2017-01-01)[2022-03-01]. http://urn. fi/URN: NBN: fi: aalto-201705304878.
[70] KALYONCU E E, PESMAN E. Bacterial cellulose as reinforcement in paper made from recycled office waste pulp [J]. **BioResources**, 2020, 15(4): 8496-8514.
[71] KALAIAPPAN K, RENGAPILLAI S, MARIMUTHU S, et al. Kombucha SCOBY-based carbon and graphene oxide wrapped sulfur/polyacrylonitrile as a high-capacity cathode in lithium-sulfur batteries[J]. **Frontiers of Chemical Science and Engineering**, 2020, 14(6): 976-987.
[72] 栾玉婷. 生物质碳基复合电极材料在超级电容器中的应用[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2016.