

## 生物技术在低次烟叶品质提升中的应用

潘倩雯<sup>1</sup>, 田晓雅<sup>1</sup>, 徐玮杰<sup>2</sup>, 陈晶瑜<sup>1</sup>, 张鑫<sup>2\*</sup>

(1. 中国农业大学 四川成都中农大现代农业产业研究院, 四川 成都 611430; 2. 上海烟草集团有限责任公司技术中心, 上海 201315)

**摘要:**我国低次烟叶的资源占用率高、利用率低,是烟草行业面临的重大挑战。烟叶中大分子物质含量过高是导致烟叶品质低下的关键因素之一。采用生物技术降解这些大分子物质、平衡化学成分并增加香气物质,是提升低次烟叶品质的有效途径之一。近年来,利用酶技术和微生物技术在改善烟叶品质领域已成为行业研究的热点。该文介绍了烟叶中淀粉、蛋白质、果胶、纤维素等大分子物质对品质的影响,并梳理总结了酶和微生物在烟草发酵中的机制及相关研究进展,旨在为进一步促进该领域的发展提供参考与借鉴。

**关键词:**低次烟叶; 发酵; 微生物; 酶; 生物技术

中图分类号: Q81

文章编号: 0254-5071(2025)12-0028-06

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.12.005

引文格式: 潘倩雯, 田晓雅, 徐玮杰, 等. 生物技术在低次烟叶品质提升中的应用[J]. 中国酿造, 2025, 44(12): 28-33.

## Application of biotechnology in improving the quality of low-grade tobacco leaves

PAN Qianwen<sup>1</sup>, TIAN Xiaoya<sup>1</sup>, XU Weijie<sup>2</sup>, CHEN Jingyu<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>2\*</sup>

(1. China Agricultural University-Sichuan Advanced Agricultural&Industrial Institute, China Agricultural University, Chengdu 611430, China; 2. Technology Centre, Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Shanghai 201315, China)

**Abstract:** The high occupancy rate and low utilization rate of low-grade tobacco leaf resources in China have been recognized as major challenges for the tobacco industry. Excessive content of macromolecular substances in tobacco leaves is one of the key factors leading to inferior quality of tobacco leaves. Using biotechnology to degrade these macromolecular substances, balance chemical components and increase aroma substances is one of the effective ways to improve the quality of low-grade tobacco leaves. In recent years, the application of enzyme technology and microbial technology in improving the quality of tobacco leaves has become a research hotspot in the industry. The influence of macromolecular substances such as starch, protein, pectin and cellulose in tobacco leaves on quality was introduced, and the mechanisms and related research progress of enzymes and microorganisms in tobacco fermentation were sorted out and summarized, aiming to provide reference and inspiration for further promoting the development of this field.

**Key words:** low-grade tobacco leaves; fermentation; microorganism; enzyme; biotechnology

烟草是我国重要的非粮经济作物,烟叶资源保障直接关系到整个产业链的健康发展。在烟叶农业生产、工业分选乃至仓储过程,均可产生品质相对稍差的烟叶;由于其品质无法满足中高端卷烟产品配方需求,在低端卷烟产品中的使用量也有限,以至容易出现库存积压,导致库存结构失衡,并且占用库容和资金<sup>[1]</sup>。实现这部分资源的有效利用,对于卷烟工业企业意义重大。

除了栽培采收、调制、打叶复烤等显性影响烟叶品质的措施工艺外,自然醇化也是改善烟叶品质的重要过程,机理主要包括氧化作用、微生物发酵、酶作用3个方面<sup>[2]</sup>,其效果关键在于促进原料中淀粉、蛋白质、果胶、纤维素、多酚、色素等大分子化合物的降解和转化,以及小分子香气物质的合成和积累,从化学成分、香气物质、感官评价3方面对品质产生积极贡献<sup>[3]</sup>。基于上述机理,可利用外源微生物或(和)酶制剂,对烟叶进行去杂气、增香气、降刺激以

及减害等定向品质改良。相较于自然醇化改善烟叶品质,外源添加微生物和酶制剂缩短了发酵期、提高了品质改善的效率,符合工业生产短时间内提质增香的需求。近年来,烟草行业鼓励支持生物技术与烟草产业的融合创新,该方向技术进一步发展并逐步落地转化,已在打叶复烤和制丝两个环节分别形成了成熟应用的烟叶(丝)生物处理工艺,有效提升了低次烟叶的使用能力<sup>[4-7]</sup>。

本文介绍大分子物质对烟叶品质的影响,进而从酶和微生物应用技术的角度,阐述生物技术在提升烟叶品质中的作用机制与研究进展,以期对烟草品质改良提供参考。

### 1 烟叶大分子物质对品质的影响

烟叶中淀粉、蛋白质、果胶和纤维素等大分子物质的含量过高是造成烟叶品质下降的重要原因<sup>[8]</sup>。这些大分子物质不仅影响烟叶的外观质量,带来杂色多、结构紧密、质地僵硬等问题<sup>[9]</sup>,而且影响燃烧过程中的香气产生,带来

收稿日期:2025-01-06

修回日期:2025-04-22

基金项目:上海烟草集团有限责任公司科研项目(K2022-1-043P);山东省重点研发计划(2024TZXD013)

作者简介:潘倩雯(2000-),女,硕士研究生,研究方向为食品生物技术。

\*通讯作者:张鑫(1986-),男,高级工程师,硕士,研究方向为烟草原料质量与工艺。

刺激性和杂气。

### 1.1 淀粉

淀粉是烟草中碳水化合物最普遍的储藏形式,在烟草调制、加工过程中不断转化从而会影响其品质,通常直链淀粉(amylose,AM)与支链淀粉(amylopectin,AP)占比约为3:7。当前国外优质烤烟的淀粉含量一般控制在2%以下,我国优质烤烟的淀粉含量一般要求低于5%<sup>[10]</sup>。烤烟淀粉不降解或降解不全会严重影响烤后烟叶的色香味,卷烟中淀粉含量过高会影响抽吸时的燃烧速度和燃烧安全性<sup>[11]</sup>。淀粉在不完全燃烧时会产生大量刺激性气体,如乙醛和丙烯醛,这会破坏香气平衡,并降低烟草的安全性。淀粉降解不全会还会导致香气化合物前体物还原糖减少、糖碱比失衡、含氮化合物含量升高,有害气体如苯、含氮气体等含量也会升高,不仅导致苦味还降低了安全性<sup>[12]</sup>。因此,适宜的淀粉含量对于烟草品质至关重要,烤烟淀粉是否充分降解已成为评价烤烟品质的重要标准。

### 1.2 蛋白质

蛋白质作为烟草中含氮化合物的主要存在形式,分为不溶性蛋白和可溶性蛋白。当前我国优质烤烟的蛋白质含量约为7%~10%,而目前新鲜烟叶中蛋白质含量一般在15%以上<sup>[13]</sup>。在烤烟烘烤过程中,蛋白质可被内源性蛋白酶降解生成短肽、游离氨基酸等,这些小分子物质会与还原糖发生美拉德反应生成各种不同的致香物质,对香气产生积极贡献<sup>[14]</sup>,但如果蛋白质含量过高,可能会导致烟气碱性增强,产生辛辣、苦涩等不良口感,甚至产生蛋白臭味,同时燃烧过程中产生氨、氰化物等有害物质,严重影响烟草的品质和消费者的接受度<sup>[15-16]</sup>。因此,在烟草的生产加工过程中,合理控制蛋白质含量及其降解程度对提高烟草品质具有重要意义。

### 1.3 果胶

果胶是烟草细胞壁的重要组成部分之一,对烟草叶片的结构和加工特性具有显著影响。烟叶中的果胶含量通常为5%~13%,作为亲水性胶体,果胶通过渗透作用吸收水分,影响烟叶的吸湿性和弹性<sup>[17]</sup>,高含量的果胶会导致烟草叶片过于柔软,在湿热地区容易吸湿过度受潮发霉,导致储存和运输过程中的烟草品质下降<sup>[18-19]</sup>。对于内在品质,果胶可被分解为半乳糖醛酸、低聚糖以及其他有机酸等其余低分子质量物质,其中半乳糖醛酸是苦味的主要来源。当果胶含量过高时,其降解产生的有机酸浓度也会显著提升,导致苦味化合物会在烟叶中积累,进一步对烟叶的香气和味道产生不利影响<sup>[20]</sup>。因此,控制果胶的含量、减少苦味化合物的积累对提升烟草品质十分重要。

### 1.4 纤维素

纤维素作为烟草细胞壁的关键构成元素,对烟草的物理特性和化学组成具有不可忽视的作用。烟草中纤维素是以D-吡喃葡萄糖为基本单位,通过 $\beta$ -1,4键连接而成的大分

子聚合物,该多糖作为烟草细胞壁的主要结构组分,在维持细胞形态和机械强度方面发挥关键作用。烟草中纤维素含量约占11%,烟叶的等级越低,纤维素的含量越高<sup>[21]</sup>。高含量的纤维素会导致烟叶粗糙易碎,影响加工过程中烟叶的可塑性;同时不利于烟叶燃烧,并在燃烧过程中热解产生甲苯、蒽、苯并芘等,带来刺激性及呛咳熏味,高温时可能产生致癌的稠环芳烃,对人体造成负面影响<sup>[22]</sup>。纤维素也可以转化为可溶性多糖或还原糖,从而增加香烟的甜味和回味。因此,合理控制烟草中的纤维素含量,对确保烟草的燃烧性能、安全性和吸食口感十分关键。

## 2 微生物菌剂改善烟叶品质

### 2.1 微生物菌剂改善烟叶品质的机制

烟叶本身存在大量的微生物,微生物群落的结构和功能通常是动态的,不同风味风格的烟草制品具有不同的菌群结构。微生物对于烟叶品质的提升主要体现在两个方面,首先,微生物群落通过分泌代谢相关酶产生小分子代谢物,以烟草内大分子物质为底物将其转变为小分子香气物质;其次,微生物利用烟叶自身的糖和蛋白质等作为碳源、氮源等促进自身代谢,在此过程中分解产生的醇类、酯类可提升烟叶香气成分<sup>[23]</sup>。如来自枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)的代谢物已被证明可以降低烟叶中的淀粉含量和其他大分子,从而提高其感官质量<sup>[24]</sup>。WEI J B等<sup>[25]</sup>分离筛选出蕈状芽孢杆菌(*Bacillus mycooides*)NS75,将烟叶中的纤维素和淀粉降解成还原糖,将蛋白质降解成氨基酸;进而还原糖和氨基酸之间的连续美拉德反应产生具有特征香味的化合物,从而提高烟叶的香气化合物数量和质量。同时,发酵时间会影响烟草的细菌丰富度和群落多样性,从而影响烟草的品质。崔钰杰等<sup>[26]</sup>使用高通量测序分析技术分析了醇化不同时间的片烟原料,研究发现随着醇化时间的延长,片烟内部微生物种群结构和功能发生变化,附生优势菌群与有机成分发生反应,从而提升了烟叶质量。因此,可通过筛选醇化过程中优势微生物进一步优化烟草品质。

### 2.2 微生物菌剂改善烟叶品质的应用

#### 2.2.1 烟草中的优势微生物

目前用于烟叶等发酵过程中提质作用的微生物类群主要包括细菌、霉菌和放线菌<sup>[27]</sup>。在发酵过程的后期阶段,细菌成为优势菌种,并展现出丰富的生物多样性<sup>[28]</sup>,烟草中微生物种类,优势菌属及作用见表1。细菌群落中大分子降解酶的丰度通常高于真菌群落,特别是水解、转移和异构化淀粉、蛋白质和纤维素的酶<sup>[29]</sup>。目前广泛使用的是芽孢杆菌属,但是在进行发酵时往往会产生氨味,不利于感官评价,因此,近年来逐渐拓展至酵母菌、霉菌、假单胞菌、不动杆菌等,随着对烟草发酵中自身微生物群落的深入研究,筛选应用合适微生物菌剂来改善低次烟叶品质已成为烟草行业的新的研究方向。

表1 烟草中微生物种类,优势菌属及作用  
Table 1 Microbial species, dominant genus and action in tobacco

种类	菌属	作用
细菌	芽孢杆菌属( <i>Bacillus</i> )、梭状芽孢杆菌属( <i>Clostridium</i> )、假单胞菌属( <i>Pseudomonas</i> )、葡萄球菌属( <i>Staphylococcus</i> )等	作用于糖代谢、脂质代谢和氨基酸代谢等
霉菌	曲霉属( <i>Aspergillus</i> )、青霉属( <i>Penicillium</i> )、链格孢属( <i>Alternaria</i> )、微子囊菌属( <i>Microascus</i> )等	通过腐生作用降解木质素、纤维素和果胶等
放线菌	链霉菌属( <i>Streptomyces</i> )、小双孢菌属( <i>Microbispora</i> )、链孢囊菌属( <i>Streptosporangium</i> )等	利用分解碳水化合物和蛋白质等

### 2.2.2 微生物提质剂的应用

近年来,微生物提质剂的应用对于烟草品质的改善已得到了实践的证明,微生物提质剂改善烟叶品质的研究进展如表2所示,微生物的添加不仅协调了烟叶自身的化学成分,并且整体提升了香气物质的含量。

表2 微生物提质剂改善烟叶品质的研究进展  
Table 2 Research progress on improving tobacco leaf quality with microbial quality enhancers

微生物	烟叶成分含量的变化	香气成分含量的变化	感官评价	参考文献
摩加夫芽孢杆菌( <i>Bacillus mojavensis</i> )	蛋白质降解率37.8%,淀粉降解率超过30%,果胶和纤维素降解率均超过10%	整体提升烟叶中酮类、酯类、杂环类和醛类等香气物质的含量与质量	-	[33]
地衣芽孢杆菌( <i>Bacillus licheniformis</i> )	-	中性挥发性香气总量提升,中苯丙氨酸转化产物、类胡萝卜素降解产物、西柏烷类降解产物和美拉德反应产物4类挥发性香气成分依次提高了36%、44%、11%和18%	显著降低烟叶杂气与刺激性,提升香气醇厚感,余味更加醇净舒适,烟叶整体平衡感较为突出	[34]
棘孢曲霉( <i>Aspergillus aculeatus</i> )	水溶性总糖的含量提高6.49%。烟叶烟碱含量降低幅18.48%,钾含量和氯含量均有所提高	有机酸、酮类、醛类、芳香类、醇类致香物质含量显著提高	提升烟丝的香气质和香气量,增加烟丝的细腻程度,烟气浓度和劲头降低,烟丝的刺激性和干燥感降低,增加口感的干净度和回甜感	[35]
成团泛菌( <i>Pantoea agglomerans</i> )	总糖、还原糖含量升高,纤维素、果胶、淀粉、木质素和蛋白质含量降低	烟叶香气总含量升高,其芳香族氨基酸降解产物、美拉德反应物、胡萝卜素降解产物、类西柏烷降解产物和新植二烯均有所增加	苦味和杂气降低,透发性、醇和度和香气质变好	[36]
假单胞菌( <i>Pseudomonas</i> )	四种烟叶中淀粉、纤维素、木质素、蛋白质、果胶的降解率可达12%、13%、12%、10%、7%以上、总糖的增加量12%以上	烟叶中酮类、酸类、酯类、杂环类、醇类和醛类物质的含量均增加	青杂气、刺激性降低	[37]

由于考虑到烟草代谢物和代谢途径中外源性功能微生物的适应性,以及避免外源微生物带来的不利影响,多数研究主要关注从烟草中分离筛选用于发酵的功能微生物,评价其作为品质改良用微生物菌剂的开发潜力。MAL L等<sup>[30]</sup>从品质较好的烟叶中筛选出枯草芽孢杆菌XP01,将其应用于低次烟叶固态发酵30 h,该菌株淀粉降解率高达33.87%,蛋白质降解率为20%,大分子物质的降解导致烟草自身碳、氮相关组分的变化,气相色谱-质谱法分析结果显示挥发性风味物质变得浓郁,风味得到改善。由此可见,分离筛选烟草内源微生物应用于自身发酵提高烟叶品质,缩短发酵时间有着重要意义。微生物的动态变化和烟草发酵过程中产生的代谢产物对烟草的品质也有重要影响。

目前利用菌制剂处理烟叶发酵的研究大部分集中于微生物最佳发酵工艺探索、有益菌筛选与鉴定、以及发酵过程中微生物多样性分析等,对于添加外源微生物影响烟草自身微生物多样性构成与菌群结构演替,进而影响烟草的品质的研究仍处于起步阶段。随着微生物组学和代谢组学的日益普及,采用多样化方法全面探究细菌群落及其代

谢产物的特征已成为现实。SONG W等<sup>[31]</sup>采用宏基因组学和代谢组学分析接种剂对发酵过程中微生物演替、代谢转移和香气产生的影响,结果表明雪茄烟叶发酵过程中的微生物演替和代谢调节是提高烟叶品质和风味的关键因素,但是上述过程中的相互作用仍有待进一步阐明。总之,探究微生物影响烟叶发酵的具体机理和协调外源有益微生物与烟叶自身微生物群落的关系对于提升烟草发酵的品质和安全性十分重要,当烟叶中原始微生物群落的发酵效果不理想时,可以根据微生物群落需要达到的发酵功能来优化或设计微生物群落。

### 2.3 菌制剂应用于烟叶品质提升的不足与瓶颈

菌制剂技术目前尚不成熟,在烟草工业中的使用还有较大限制。首先是安全性问题,工业生产中烟草进行发酵需要严格控制发酵前、中、后阶段的环境温度与湿度,若条件不适宜则容易滋生霉菌,可能产生对人体健康有害的代谢产物,存在潜在的致癌风险。YANG Y等<sup>[32]</sup>认为烘烤和再干燥是烟草发酵前的重要处理阶段,基于高通量测序技术分析来自不同加工阶段的烟叶的真菌群落后,发现曲霉

属和青霉属主要在烟熏干燥阶段显著富集。这些霉菌在烟草储存和发酵过程中可能起到关键作用,成为导致霉变的潜在风险源。因此,在烘烤阶段严格控制霉菌的滋生,可以有效降低烟叶在后续加工和长期老化过程中发霉的风险,进而最大程度地减轻对烟叶品质的不利影响。同时,不同地区的烟叶特性差异较大,选用菌种种类以及具体的对应生长培养环境都需要进一步的优化,并且外源菌制剂的加入对烟草本身微生物群落的演替发展是否会有负面影响仍是需要深入研究的问题。其次是风味问题,芽孢杆菌属作为工业发酵领域的重要功能菌属,其代谢过程中产生的胺类物质及吡嗪类化合物会导致特征性不良风味。尽管模式菌株枯草芽孢杆菌通常被认为是食品级菌株,但异味物质的形成往往会导致终端产品感官品质低下,从限制其工业化发展的进程。

### 3 酶制剂改善烟叶品质

#### 3.1 酶制剂改善烟叶品质的机制

生物酶制剂在低次烟叶生产过程中具有重要作用。酶是生物化学反应的催化剂,可降低反应的活化能,能够高效无害地转化或分解大分子底物,有效降低不利于烟叶品质的细胞壁物质含量,提高还原糖、致香性物质含量,同时有效降低卷烟危害,减少不利于感官品质的化学因素,充分协调化学组分<sup>[38]</sup>。外源酶制剂对于烟草品质提升的作用主要表现在两方面,一是酶自身可以通过分解淀粉、蛋白质、色素和其他物质并增加芳香族化合物的含量来改善烟草的外观和风味。樊文举<sup>[39]</sup>研究表明,酶处理显著提烟叶中的糖含量,协调化学成分,影响烤后烟叶的色泽、表面形态和热解特性。二是外源酶制剂的加入提升烟草中微生物群落的多样性,进而改善烟叶品质。郑杰等<sup>[40]</sup>分析了酶制剂处理后烟叶微生物的多样性,结果表明喷施外源酶制剂后烟叶中细菌群落丰富度显著提高。多样化的微生物通过不同的代谢途径作用于烟草化合物,如芽孢杆菌属能

够降解烟碱,硝化菌门可将硝酸盐还原为亚硝酸盐,酶制剂的添加促进微生物群落的演替,这些有益菌属数量的提升对烟叶品质的改善起积极作用。

#### 3.2 酶制剂改善烟叶品质的应用

酶技术是公认的符合环保要求和生物安全的绿色生产工艺,在茶叶加工中添加外源酶进行辅助可促进茶叶内含物质的有益转化,提升茶叶的品质<sup>[41]</sup>。在烟草行业中,考虑到时间、经济的成本,利用酶制剂快速高效的改善产品品质已成为行业的研究热点,我国在应用外源酶改善产品质量尤其是香气质、香气量和各种化学成分的协调性方面早已初有成果,而国外相关报道较少。目前应用于加工工艺中提高产品质量的酶主要有:蛋白酶、 $\alpha$ -淀粉酶、葡聚糖酶、纤维素酶、果胶酶、木质素酶等。但在发酵过程中,仅用一种外加酶对烟草进行品质调控是片面的,而同时添加两种或两种以上的酶,较于仅加一种酶在改善烟草的化学成分、提高其吸味品质方面有更大的优势。

近年来,应用复合酶制剂用于提升烟叶品质的研究已取得一定成果,研究主要聚焦于如何通过酶制剂的作用,优化烟叶的化学组成,进而提升其整体品质。烟叶复合生物酶提质剂应用的研究进展见表3。由表3可知,复合生物酶制剂常使用纤维素酶、淀粉酶、蛋白酶等,针对烟叶中的大分子物质具有较好的降解效果。酶制剂的应用表明通过选择合适的酶及对配方、作用条件进行优化,可有效降低烟叶中淀粉、蛋白质、纤维素、果胶等大分子物质,产生并积累关键致香组分,减少有害组分,使烟叶化学品质朝有利方向发展。与此同时,如何在长期运输过程中保持酶制剂的稳定性成为亟待解决的问题。孙志康等<sup>[42]</sup>通过氯化钙、磷酸氢二钠澄清,再经乙醇醇沉,将沉淀冷冻干燥后得到固体淀粉酶制剂在60 d仍具有91.12%的相对酶活。这一结果为提升酶制剂的稳定性,拓宽其在烟叶品质提升中的长期应用提供了有力的支持。

表3 生物酶制剂提质应用的研究进展

Table 3 Research progress on quality improvement applications of biological enzyme preparations

复合酶组成	烟叶成分含量的变化	香气物质/有害成分含量的变化	感官评价	参考文献
纤维素酶、聚半乳糖醛酸酶	纤维素、果胶和木质素含量下降1.3%~13.5%、1.5%~14.1%和2.1%~8.6%,总糖和还原糖、钾离子、植物生物碱、总氮和氯离子含量增加	总中性香气物质质量随纤维素酶浓度的增加而显著增加	-	[43]
淀粉酶、纤维素酶	淀粉和尼古丁含量降低30.36%和18.45%,总糖和还原糖增加2.86%和45.56%	新植二烯含量显著提升	较好的透气性和舒适性,并且香气明显、质感好、烟气柔软、品质显著提高	[44]
复合纤维素酶、木瓜蛋白酶	还原糖含量上升	主要挥发性成分对烟草香气品质贡献较大	降低卷烟烟气刺激性,在香气、协调、杂气、刺激性及余味方面均有一定程度的提升	[45]
纤维素酶、果胶酶、糖化酶、淀粉酶、过氧化氢酶、漆酶、酸性蛋白酶	总糖、还原糖含量稍有降低,总植物碱、总氮、淀粉、蛋白质降低了10%、7%、8.7%、7.7%	致香成分总量增加21%、醛类、酮类、脂肪酸及其酯类含量上升	青气明显减弱,有陈烟香,甜润感好,柔和性、透发性较好,刺激降低	[46]
木瓜蛋白酶、淀粉-1,4-葡萄糖苷酶、脂氧合酶、 $\beta$ -葡聚糖酶、普鲁兰酶、果胶酶等	淀粉、蛋白质和烟碱含量分别下降8.59%、10.92%、8.60%,还原糖含量上升7.50%	氨、亚硝酸胺、苯酚、一氧化碳、苯并[a]芘分别下降了18.10%、18.80%、14.12%、5.05%、10.03%	刺激性降低,舒适性提高,余味略微改善,杂气明显降低	[47]

目前利用酶制剂处理烟叶发酵的研究大部分用于烟草增香、提质和减害,而对于酶制剂自身性能,尤其是稳定性和普适性的研究相对较少,并且探究酶制剂影响烟叶微生物群落丰富度和多样性的机制也缺乏深入研究。这些领域的不足限制了酶制剂在烟叶发酵中的应用和优化,因此,未来的研究需要加强对这些方面的探索,以推动酶制剂技术的进一步发展。

### 3.3 酶制剂应用于烟叶品质提升的不足与瓶颈

生物酶处理可以极大的减少生产成本,提高产品质量,但是目前此类应用仍然存在着众多限制酶规模化应用的技术性问题。首先,酶制剂可以显著影响烟叶色泽、表面形态和其他特性,但在酶溶液和烘烤失水的双重作用下,烟叶的正面表皮细胞有不同程度的疏松变形。杨庆等<sup>[46]</sup>研究表明,经复合酶醇化后,烟叶物理结构发生变化,烟叶背面不仅出现细孔,并且细胞间隙变大并凸显细胞轮廓,同时烟叶截面与对照样对比变得膨松,烟叶正面细胞间隙变大,细胞轮廓凸显。其次,不同类型的酶需要不同的温度、pH和作用时间才能达到较高的活性,实验室阶段发酵温度与工业上有一定差距,选择合适的反应环境是提高生产效率和稳定性的关键问题。最后,不同地区不同部位烟叶其品质特性存在着巨大差异,最佳的反应条件及复合酶制剂配比不是固定不变的,针对不同来源的烟叶需进一步探索相关条件。

### 4 总结与展望

随着我国工业制烟技术的发展与消费增长的需求,烟草行业也愈发重视利用发酵技术提升低次烟叶品质。尽管我国制烟行业起步较晚,但就提升烟叶品质而言,我国生物技术发展较快,烟草行业将生物技术与传统发酵工艺相结合,应用以微生物与酶为主的提质剂实现烟叶品质的改良并在工业上初有成效,验证了生物技术规模化应用的可行性,目前仍需注意下列问题:

烟草发酵过程中微生物群落总量呈下降趋势,湿热条件下易滋生霉菌变质,甚至可能产生对人体有害的毒素,从而降低烟叶香气质量与安全性。同时目前对于外加微生物菌剂与烟草中微生物的相互作用,其是否会对微生物群落结构产生不良影响的研究较少,并且国内工业化菌种较为单一,关联度不紧密。

酶对于发酵过程中的化学成分的调控取决于酶配方及酶活。酶活性受温度、水分、pH等多种因素影响,需要满足其最适条件才能发挥最大催化作用,但是工业化加工条件与技术难以维持最适条件下的酶活。

在今后研究中应充分融合发展微生物学和酶学技术,将实验水平与工业生产相结合,充分认识发酵过程中微生物群落演替规律并加以利用,筛选出优势菌种并且根据地区特点合理优化酶配方比例,特异性定制专项发酵剂,

结合工艺改进降低烟草内有害物质,协调小分子香气物质组分,从而提升烟叶品质,以达到规模化生产,提高低次烟叶利用率,推动烟草工业朝着绿色化、品质化方向转型升级。

### 参考文献:

- [1] 王建兵,罗海涛,王得强,等. 库存低次烟叶模块提质技术的应用[J]. 湖南农业科学, 2017(11):61-64,68.
- [2] 周权威,刘路路,杨振,等. 雪茄烟叶在不同发酵条件下的风味物质分析研究进展[J]. 中国农学通报, 2024, 40(27):144-151.
- [3] 宋鹏. 微生物发酵降低卷烟烟气中有害成分及提高卷烟质量的研究[D]. 西安:西北大学, 2008.
- [4] 李力群,郭春生,郝捷,等. 一种生物酶处理烟叶的方法、及制得的烟叶和卷烟:CN202010982036.X[P]. 2022-07-05.
- [5] 李力群,乔月梅,郭春生,等. 一种打叶复烤烟叶的处理方法:CN202010979665.7[P]. 2022-07-05.
- [6] 付金存,游敏,范幸龙,等. 一种提升不适用烟叶品质的方法及其应用:CN202211541312.4[P]. 2023-06-13.
- [7] 李易非,范明登,姜焕元,等. 烟叶复烤方法:CN202410172774.6[P]. 2024-03-29.
- [8] WEN C, ZHANG Q Y, ZHU P C, et al. High throughput screening of key functional strains based on improving tobacco quality and mixed fermentation[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, 11: 1108766.
- [9] 刘洪坤,毛文龙,游敏,等. 改善低次烟叶品质的生物发酵工艺优化[J]. 中国烟草科学, 2024, 45(2):99-107.
- [10] 董维杰,张忠锋,窦玉青,等. 烤烟烟叶淀粉含量影响因素及其与烟叶质量关系研究进展[J]. 广东农业科学, 2015, 42(8):11-16.
- [11] ZHANG Y, JIANG C D, LI Y Y, et al. Screening, identification, and mechanism analysis of starch-degrading bacteria during curing process in tobacco leaf[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024, 12: 1332113.
- [12] 湛佳伟,谢良文,刘健康,等. 烤烟上部叶成熟度与烟叶僵硬的关系分析[J]. 烟草科技, 2024, 57(11):47-57.
- [13] 张有奇,张泉彬,霍天辰,等. 烟草源高产蛋白酶菌株筛选及其酶特性[J]. 河南农业大学学报, 2025, 59(3):455-462.
- [14] JIANG C D, KONG D C, LI Y Y, et al. Degradation and mechanism analysis of protein macromolecules by functional bacteria in tobacco leaves[J]. *Front Microbiol*, 2024, 15: 1416734.
- [15] 周乐,周桂园,胡巍耀,等. 利用酶与微生物降低梗膏中果胶和蛋白质的研究[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(1):123-134.
- [16] 普元柱,包秀萍,王松峰,等. 风味蛋白酶降低烟叶中蛋白质含量的研究[J]. 食品工业, 2013, 34(8):146-149.
- [17] 孙斯文. 烟草果胶生物降解及应用技术研究[D]. 郑州:郑州轻工业学院, 2015.
- [18] 聂立璇,陈善义,陈千思,等. 烟叶果胶研究进展[J]. 中南农业科技, 2023, 44(4):240-242.
- [19] 王鹏,唐杰,杨明宇,等. 烟草果胶和纤维素含量<sup>13</sup>C MultiCP/MAS NMR同时测量[J]. 安徽农业大学学报, 2024, 51(3):516-522.
- [20] SU Y B, CUI Y H, FU K J, et al. Contribution of pectin-degrading bacteria to the quality of cigar fermentation: an analysis based on microbial communities and physicochemical components[J]. *Front Microbiol*, 2024, 15: 1481158.

- [21] 郝捷,季婧,李力群,等. 生物酶和微生物技术改善烟叶香气的研究进展[J]. 生物技术进展,2022,12(6):817-824.
- [22] 马海燕. 果胶酶和纤维素酶对烤烟中化学成分的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2009.
- [23] 张玉姣,宋金鹏,郭学民,等. 烟叶微生物菌群变化及微生物在烟叶中的应用现状[J]. 中国酿造,2022,41(6):31-36.
- [24] CHEN X F, LONG T, HUANG S X, et al. Metabolomics-based study of chemical compositions in cellulase additives derived from a tobacco-origin *Bacillus subtilis* and their impact on tobacco sensory attributes[J]. *Arch Microbiol*, 2024, 206(4): 163.
- [25] WEI J B, SONG K, ZANG Z P, et al. Influence of specific tobacco endophytic *Bacillus* on tobacco leaf quality enhancement during fermentation [J]. *Front Microbiol*, 2024, 15: 1468492.
- [26] 崔钰杰,邹克兴,陈义昌,等. 不同醇化时间对片烟原料附生细菌种群多样性及质量的影响[J]. 山东农业科学,2024,56(2):77-85.
- [27] 李秀妮,李猛,万德建,等. 烟叶微生物及其在烟叶发酵和醇化中的作用研究进展[J]. 微生物学通报,2019,46(6):1520-1529.
- [28] WENG S N, DENG M Z, CHEN S Y, et al. Application of pectin hydrolyzing bacteria in tobacco to improve flue-cured tobacco quality[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024, 12: 1340160.
- [29] NING Y, ZHANG L Y, MAI J, et al. Tobacco microbial screening and application in improving the quality of tobacco in different physical states[J]. *Bioresour Bioprocess*, 2023, 10(1): 32.
- [30] MA L L, WANG Y, WANG X, et al. Solid-state fermentation improves tobacco leaves quality via the screened *Bacillus subtilis* of simultaneously degrading starch and protein ability[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2024, 196(1): 506-521.
- [31] SONG W, CHEN X, YU J, et al. Effects of *Bacillus altitudinis* inoculants on cigar tobacco leaf fermentation[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024, 12: 1417601.
- [32] YANG Y, PAN G W, GUO J H, et al. The effect of flue-curing and redrying on the diversity of fungal communities in tobacco leaves[J]. *BMC Microbiol*, 2024, 24(1): 494.
- [33] 李正风,张鹏,王萝萍,等. 摩加夫芽孢杆菌产酶条件优化及对烟叶品质的影响[J]. 中国烟草科学,2023,44(3):69-76.
- [34] 宋雯,陈曦,余君,等. 地衣芽孢杆菌对雪茄烟叶发酵产香及菌群演替的影响[J]. 湖南农业科学,2023(8):69-75.
- [35] 张怡帆,胡苏林,杜文杰,等. 一株具有多糖降解酶活性的真菌菌株的筛选及其在烟叶品质提升中的应用研究[J]. 中国烟草学报,2024,30(4):84-94.
- [36] 张蒙蒙. 单宁降解菌的筛选、鉴定及其在雪茄烟叶发酵中的应用研究[D]. 郑州:河南农业大学,2023.
- [37] 于少藤. 烟叶有益微生物的筛选及其对烟叶品质改良的研究[D]. 南京:南京农业大学,2020.
- [38] 黄申,芦尧,刘强,等. 生物酶在烟草工业中的应用研究进展[J]. 轻工学报,2023,38(5):112-118.
- [39] 樊文举. 不同酶制剂对烤烟烟叶品质影响的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [40] 郑杰,张傲杰,王平平,等. 初烤阶段喷施外源酶制剂对烟叶品质及生物多样性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024(12):1-10.
- [41] 杨丽娟,王伟伟,许勇泉,等. 外源酶在红茶加工中的应用研究进展[J]. 食品工业科技,2024,45(7):344-351.
- [42] 孙志康,李选文,季婧,等. 烟草源高产淀粉酶菌株的分离鉴定、发酵条件优化及固体淀粉酶制剂的制备[J]. 中国酿造,2024,43(8):190-196.
- [43] ZHU X L, TAN L L, FENG G L, et al. Research on degradation of cellulose using enzyme treatment in flue-cured tobacco by <sup>13</sup>C NMR spectroscopy[J]. *Cellulose*, 2015, 22(4): 2693-2702.
- [44] NING Y, MAI J, HU B B, et al. Study on the effect of enzymatic treatment of tobacco on HnB cigarettes and microbial succession during fermentation[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2023, 107(13): 4217-4232.
- [45] 许春平,杨琛琛,王铮,等. 复合生物酶液处理低次烟叶制备烟用香料[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2014,29(2):23-26.
- [46] 杨庆,肖明礼,林锐峰,等. 复合酶改善烟叶醇化品质的研究[J]. 西南农业学报,2014,27(4):1746-1750.
- [47] 邓羽翔,周东,陈思昂,等. 复合生物酶对烟叶的提质减害作用研究[J]. 安徽农业科学,2022,50(19):176-179.