



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.

HUANG S, LU Y, LIU Q, et al. Review on application of biological enzymes in tobacco industry[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(5): 112-118. DOI: 10.12187/2023.05.015

生物酶在烟草工业中的应用研究进展

黄申¹, 芦尧¹, 刘强², 赵声辰², 陈芝飞², 毛多斌¹

1. 郑州轻工业大学烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南中烟工业有限责任公司技术中心, 河南 郑州 450002

摘要: 基于生物酶处理对烟草及其制品品质变化的显著影响, 综述了近年来生物酶处理在烟草提质、产香和减害等方面的研究成果, 分析了生物酶在研究中存在的薄弱环节及问题。认为: 烟叶中淀粉和果胶的酶催化降解相关研究取得较大进展, 其中复合酶的作用效果多优于单一酶; 漆酶与蛋白酶搭配处理梗丝效果较单一酶处理更好, 同时, 对烟梗进行酸处理、碱处理和汽爆处理可显著提高酶解效果; 在烟草薄片制备原料再造烟叶浓缩液中, 生物酶更容易发挥作用, 具有处理时间短、效率高和作用效果显著等优点; 在产香方面, 生物酶主要通过产生参与美拉德反应的物质或催化香味前体物产香实现; 在减害方面, 生物酶主要通过降低烟草特有亚硝胺和烟气自由基等有害物质含量来实现。未来可从烟草生物大分子结构表征和特性研究、烟用酶制剂创制和催化机制解析两方面进行深入研究, 以进一步推进生物酶在烟草增香、提质和减害等方面的研究及应用。

关键词: 生物酶; 烟草工业; 烟叶处理; 烟梗处理

中图分类号: TS41⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2023)05-0112-07

0 引言

生物酶因其催化条件温和、催化效率和生物安全性高、作用效果显著等特点, 已被广泛应用于医药生产^[1]、食品加工^[2]等行业^[3]。

烟叶中普遍存在蛋白质、淀粉、果胶、纤维素等生物大分子, 其含量过高会在卷烟燃吸过程中产生刺激性气味及多种有害成分, 从而对烟草制品的感官品质产生不良影响^[4], 而蛋白酶^[5]、淀粉

酶^[6]、果胶酶^[7]、纤维素酶^[8]等可将对应底物催化水解生成香味物质或其前体物, 因此相应的催化水解机制已成为烟草工业的研究热点之一。西柏烯类^[9]、类胡萝卜素类^[10]、糖苷类^[11]等是烟草重要的香味前体物, 其催化转化过程也可由特定酶来完成。已有研究^[12]表明, 生物酶也可用于烟用香料的开发。生物酶的特点和功能决定其可在一定程度上改变烟草的化学组成, 进而改善卷烟的感官品质。

收稿日期: 2022-10-17; 修回日期: 2023-03-27; 出版日期: 2023-10-15

基金项目: 中国烟草总公司科技重点研发项目(110202202006), 河南中烟工业有限责任公司重点科技项目(2021410001300102)

作者简介: 黄申(1981—), 男, 河南省周口市人, 郑州轻工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为烟草生物技术、生物催化与转化。E-mail: huangshen@zzuli.edu.cn

通信作者: 毛多斌(1962—), 男, 河南省南阳市人, 郑州轻工业大学教授, 博士, 主要研究方向为烟草化学与香精香料、生物催化与转化。E-mail: duobinmao@126.com

合理利用生物酶处理烟叶及烟草制品能够增加卷烟香气、减少杂气和刺激性、降低危害,达到改善卷烟感官品质的目的^[13]。因此,烟草生物酶的创制、应用和催化功能研究具有重要意义。本文拟对烟草工业中生物酶的应用研究进行综述,分析生物酶在烟草领域应用中存在的问题,展望本领域技术发展,旨在为烟用酶制剂创制、功能开发及应用提供参考。

1 生物酶在烟叶处理中的应用

近年来,生物酶主要被用来处理烟叶以降解蛋白质、果胶、淀粉等生物大分子、降低烟叶杂气和刺激性、提升烟叶品质等,其种类分为单酶制剂、混合酶制剂及粗酶制剂。处理对象包括新鲜烟叶、单料烟、模块烟等,处理阶段包括烟叶初烤前、烟叶陈化后、在线制丝等环节。

将生物酶喷在初烤前新鲜成熟烟叶上,初烤过程中在烤房适合的温湿度条件下,生物酶发挥催化作用,起到调节烟草化学组分,改善烟叶品质的作用。樊文举等^[14-15]将果胶酶喷在新鲜成熟烟叶(NC99中部叶)上,晾干初烤后,发现烟叶中常规化学成分更协调、烟叶香气总量及热失重率增加,烟叶整体品质明显提升。雷亚芳^[16]将 α -淀粉酶和纤维素酶混合而成的复合酶喷施在新鲜成熟的陕南K326上部烟叶上,晾干初烤后,发现烟叶淀粉含量和总糖含量降低、还原糖含量增加,且香气浓度增加、香气质量得到改善、杂气和刺激性减少。王林等^[11]将混合酶(中性蛋白质酶、 α -淀粉酶和糖化酶)喷在新鲜烟叶(中烟100上部叶)上,晾干初烤后,发现烟叶中可溶性糖含量及游离态和糖苷结合态中性香气成分含量提高,烟叶品质得到改善。S. S. Lin等^[17]使用蛋白水解酶和木聚糖水解酶处理新鲜烟叶,初烤后,发现烟叶和卷烟烟气中的烟碱分别降低了11.55%和21.85%。

生物酶亦可用于催化处理陈化后烤烟烟丝,处理数小时后,烟丝中生物大分子含量明显降低,烟丝感官品质得以提高。朱晓兰等^[18]使用果胶甲酯酶、果胶裂解酶、半乳糖醛酸酶、纤维素复合酶分别处理烤烟烟丝(云南烟叶C3F)5 h后可有效降低烟叶中

果胶含量,其中经果胶裂解酶和纤维素酶处理后的烟叶中性香味成分分别提高了24.4%和21.9%。之后,该团队利用纤维素酶处理烤烟烟丝,发现烟丝中纤维素的降解率最高可达13.5%,苯丙氨酸降解产物、美拉德反应产物、类胡萝卜素降解产物和新植二烯等中性香味成分的含量均显著增加,中性香味物质总含量提升了 $50 \mu\text{g/g}$ ^[19]。沙云菲等^[20]利用复合酶制剂(淀粉酶、蛋白酶、果胶酶和纤维素酶)处理烟丝B2F(pH值为7.7、含水量54%),酶解时间5.5 h,淀粉和蛋白质降解率分别达到19.54%和20.03%,酶处理后,烟叶的杂气、劲头和刺激性得到明显改善。郑娟娟^[21]利用 α -淀粉酶、糖化酶、纤维素酶、果胶酶、中性蛋白酶和木瓜蛋白酶混合成的复合酶制剂酶解烟丝(宝鸡X3F和商洛B3F),酶解条件为温度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 、时间4 h,发现烟丝还原糖含量增加,挥发性香气成分含量大幅提升,烟气细腻柔和、甜感增加。罗丹等^[22]使用 α -淀粉酶和糖化酶在 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下处理烟丝(云烟85C3F,产地凉山)8 h,发现烟丝中直链淀粉和支链淀粉分别减少了34.5%和66.7%;但酶处理后烟叶组织结构由于淀粉降解而出现塌陷,呈现大面积的凹凸不平区域。李洪涛等^[23]利用蛋白酶、淀粉-1,4-葡萄糖苷酶、酸性木聚糖酶、脂氧合酶、纤维素酶混合成的复合酶制剂处理复烤山东TBO片烟(2009)7 d,发现处理后烟叶枯焦气降低,烟香增加,余味得到改善。

也有研究人员利用筛选得到的可降解生物大分子微生物表达的酶处理烟叶,如王宝强等^[24]在筛选产淀粉酶微生物的基础上制备了淀粉酶,用该酶处理K326B4F烟叶48 h,发现烟叶感官品质得到改善。贺兆伟等^[25]用疣孢青霉菌株TS63-9所产粗酶液处理烟丝(红花大金元C3F),处理条件为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、8 h,发现其可显著降低烟丝中果胶含量,烟叶感官品质也得到一定程度改善。

此外,有研究^[26]将复合生物酶应用于在线制丝环节(酶解条件为 $50\sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $4\sim 6 \text{ h}$),发现处理后膨胀烟丝的木质气、枯焦气明显减轻,淀粉、蛋白质和烟碱含量降低,膨胀烟丝的感官品质和配伍性显著提升,该研究为生物酶的在线应用提供了例证。

由以上研究可知,近年来关于淀粉、果胶酶催化降解方面的相关研究取得了较大进展,复合酶的作用效果多优于单一酶,并且在烟草生物大分子降解的同时常常伴随着烟叶感官品质的提高,以及烟叶杂气和刺激性的降低。但烟用生物酶创制、生物酶催化转化机制、适应卷烟生产条件酶制剂开发等相关研究鲜有报道,亟待深入研究。

2 生物酶在烟梗处理中的应用

由烟梗制作的梗丝是卷烟配方的主要原料之一,具有提高燃烧性和降低烟碱、焦油的作用,但梗丝中的木质素、纤维素、半纤维素、果胶等生物大分子在燃烧过程中会产生木质气和刺激性,影响卷烟的感官品质。生物酶处理烟梗还可以降低其中的木质素和纤维素的含量。

近年来,烟梗中木质素的降解多采用漆酶、氧化物酶和仿酶,高温(45~55℃)条件下处理数小时,可明显降低木质素的含量。杨云^[27]使用不同产地漆酶处理烟梗丝,发现白腐菌产的漆酶 DENYKEM PAP-5 对烟梗中木质素降解效果最好,降解率可达 15.92%,且处理后的烟梗感官品质明显提升。于建军等^[28]研究发现,漆酶降解梗丝木质素的条件为温度 45℃、漆酶用量 20.0 U/g,处理梗丝 3 h 后木质素理论降解率为 55.05%,且酶解后的梗丝表面更加光滑、毛突减少,香气量提高、香气质和余味得到改善。魏登辉^[29]利用 Fe-CA 仿酶和漆酶分别处理梗丝发现梗丝中木质素降解率分别达到 53.03% 和 55.05%,香气质和香气量得以提升、木质气减少、刺激性降低。但也有研究^[30]表明,使用生物酶处理烟梗浆料后,梗丝的物理结构会遭到破坏。

宋自力等^[31-32]使用白腐菌产漆酶发酵培养基筛选出多株漆酶高产菌,使用筛选出的血红密孔菌发酵粗酶液和菌丝对烟梗进行生物降解,发现漆酶可以有效降解烟梗中的木质素、纤维素、半纤维素和果胶,且使用漆酶、纤维素酶、半纤维素酶和果胶酶组成的复合酶处理烟梗可达到同样效果,该方法可大幅降低漆酶用量,减少工业成本。姜林峰^[5]将漆酶和中性蛋白酶混合后酶解烟梗,发现酶处理既降低了烟梗中木质素含量又抑制了

其中蛋白质含量的增加。Y. Zhu 等^[33]研究表明,漆酶降解烟梗木质素的机制可能是它可以破坏烟梗木质素酚型苯环间的 β -O-4 连接键,从而加速木质素的氧化解聚。

此外,亦有利用糖苷酶(纤维素酶、果胶酶等)处理烟梗以降低其纤维素、半纤维素和果胶含量的报道。赵梦醒等^[34]用纤维素酶和半纤维素酶处理烟梗浸提液可明显改善烟梗打浆性能。徐达等^[35]使用复合酶制剂(复合植物水解酶、果胶酶、蛋白酶、淀粉酶)酶解梗丝 4 h 后,其水溶性总糖和美拉德反应产物含量分别提高了 23.31% 和 196.3%,果胶含量降低了 17.26%,将处理后的梗丝按照质量分数 15% 的掺配比例添加到金圣卷烟叶组中,叶组焦油含量降低了 0.25 mg/支。杨乾栩等^[36]利用酸性蛋白酶、果胶酶、纤维素酶组成的复合酶处理烟梗 24 h 后,烟梗中的大分子物质总水解率达 28.34%,烟梗刺激性降低,杂气得以改善,余味也有所提升,其感官品质和工业可用性得到提高。邹芳等^[37]使用筛选出的枯草芽孢杆菌 YC-2 降解烟草秸秆(与梗丝成分接近)7 d 后,发现烟秆降解率为 10.14%,酶学特性表明该酶稳定性较好,有较强的应用潜力。Y. Y. Han 等^[38]利用果胶酶对预爆和搓丝处理的烟梗进行酶解后发现,半乳糖醛酸的含量明显提高,但烟梗的化学结构没有明显变化。

综上所述,单独使用漆酶可有效降低烟梗中木质素含量,但同时会增加蛋白质含量,增大梗丝的刺激性、杂气,且在一定程度上破坏梗丝的物理结构,影响其可用性,因此漆酶与蛋白酶搭配使用效果更佳。其他水解酶的复合物可一定程度降解烟梗中的大分子物质,增加可溶性糖含量,进而降低梗丝的杂气和刺激性。此外,对烟梗进行酸处理、碱处理、汽爆处理等预处理后再进行酶解处理,可显著提高酶解效果。

3 生物酶在烟草薄片生产中的应用

再造烟叶浓缩液是烟草及其制品的水提浓缩物,其中含有大量的烟草生物大分子物质,但香味物质含量较少,在用其制备造纸法生产烟草薄片时会影响烟草薄片的品质^[39]。在烟草薄片工业生产中,可以应

用生物酶对再造烟叶浓缩液中的生物大分子香味前体物等进行催化转化,以提升其品质和可用性。

马科等^[40]利用中性蛋白酶处理再造烟叶浓缩液,发现浓缩液中蛋白质、还原糖、总糖和氨基酸质量分数均大幅降低,新增 4-环戊烯-1,3-二酮、 β -紫罗兰酮等 10 种香味物质,烟草薄片的香气、协调性、刺激性、余味等均得到改善。许春平等^[41-42]利用由微紫青霉(*Penicillium janthinellum* sw09)产生的果胶酶分别处理再造烟叶原料烟梗末与烟梗,在最优处理条件下烟梗末及烟梗中果胶降解率分别达到 38.92% 和 41.35%,对酶解后烟梗的热裂解产物进行分析,发现苯乙酮含量增加、乙酸含量减少、香味物质吡咯含量升高。C. Chen 等^[43]为提高再造烟叶片的品质,采用弱碱强化漆酶水解的方法去除烟梗中的木质素,发现漆酶、弱碱和吐温 80 协同作用能显著提高木质素降解率(高达 40.3%)。徐菲菲等^[44]依次使用蛋白酶和果胶酶处理再造烟叶浓缩液 4 h 后,香气成分总量增加了 22%,刺激性降低的同时烟香气质得到了提升。赵梦醒等^[30,34]利用纤维素酶和半纤维素酶预处理烟梗 5 h,其浆料中纤维素的相对含量增加,而烟碱类物质相对含量减少,烟梗浆料的热稳定性得以提高。王茜茜等^[45]将混合酶(纤维素酶、木聚糖酶、蛋白酶等)应用于梗二级提取段过程,可有效减少再造烟叶浓缩液中大分子物质含量,提高再造烟叶内在品质及使用价值,但该酶制剂组成复杂,成本较高。刘恩芬等^[46]利用混合酶(淀粉酶、蛋白酶、果胶酶及纤维素酶)对烟梗膏稀释放液进行酶解转化处理,可在一定程度上控制烟梗提取液中高分子物质的含量,为生产过程中烟梗提取液的品质提升奠定一定的理论依据。

综上所述可知,因为再造烟叶浓缩液为有水环境,相较于烟叶、烟梗和烟丝,生物酶处理再造烟叶浓缩液具有处理时间短、效率高、作用效果显著等优点,是生物酶应用于烟草工业的重要应用窗口。

4 生物酶在生物产香中的应用

近年来,利用酶进行生物产香的研究逐渐成为

烟草行业的热点之一,且多数集中在利用水解酶和氧化还原酶处理烟草提取物,以产生新的香味成分,并将其制备成烟用香料。

刘彩红^[47]采用淀粉酶和 β -淀粉酶水解烟草废弃物 7 h,将酶解液与 L-丙氨酸进行美拉德反应,反应物中检测出与烟草相关的香味成分 57 种,两种酶对卷烟香气有较好的修饰作用。许春平等^[48]利用纤维素酶与木瓜蛋白酶处理烟末水提物并进行美拉德反应,反应物检测出与烟草相关的香味成分 38 种,且反应物能降低卷烟烟气的刺激性,协调香味。刘珊等^[49]利用黄嘌呤氧化酶催化氧化降解 β -胡萝卜素,生成了烟草及烟草制品中的重要香气物质(如异佛尔酮、 β -环柠檬醛、 β -紫罗兰酮及二氢猕猴桃内酯等)。白家峰等^[12]用酶降解烟草花蕾,然后进行美拉德反应,产物中软脂酸、肉豆蔻酸、苯甲醇、苯乙醛、三环烯等物质含量较高,二氢猕猴桃内酯、大马士酮、油酸酰胺、2-正戊基咪喃等致香物质含量提高,对烟草香气贡献突出,但作者并未交代酶的种类和来源。

由以上研究可知,目前烟草行业利用酶进行生物产香主要有 3 种途径:一是利用水解酶降解烟草生物大分子物质(包括蛋白质和多糖类成分),所产生的氨基酸和糖进行美拉德反应生成香气物质;二是利用糖苷水解酶催化转化烟草香味前体物生成香气物质;三是利用氧化还原酶直接催化香味前体物产香,但是该方向尚缺乏系统性研究,产香机制也尚未完全阐明。

5 生物酶在烟草工业中其他方面的应用

目前,亦有利用生物酶降解烟草有害成分及利用烟草资源生产高附加值酶等方面的报道。刘兴余等^[50]将生物酶用于卷烟和再造烟叶生产过程,酶解后烟叶中 NNK(4-甲基亚硝胺基-1-3-吡啶基-1-丁酮)释放量选择性降低了 23.2%,且酶解烟叶所制卷烟的感官评价结果与对照组无明显差异。L. Z. Liu 等^[51]将过氧化氢酶固定在聚丙烯酰胺壳中制备的纳米胶囊能有效清除烟草烟雾中 90% 的自由基。C. W. Dong 等^[52]利用来自假单胞菌的烟碱羟

化酶催化6-羟基-3-琥珀酰吡啶转化成2,5-二羟基吡啶,后者是抗癌药物5-氨基乙酰丙酸的前体物。Y. X. Zheng等^[53]使用固定化米根霉发酵烟草工业废水以生产内、外切聚半乳糖醛酸酶(可水解木质纤维素果胶),实现果胶降解酶的高效生产。G. Zhang等^[54]从雪茄茄衣中分离出龙舌兰杆菌,该菌可表达碱性果胶酶,果胶酶活性最高可达1370 U/mL。

从以上研究可知,生物酶在烟草工业中的应用还包括:利用生物酶催化转化烟草有害物以降低其含量,催化转化尼古丁以获得药物前体物,以及从烟草源微生物中挖掘重要功能基因等。

6 结论与展望

目前,生物酶在烟草工业中的研究多集中于利用生物酶处理烟草及烟草制品,以降低烟草中生物大分子物质含量和有害物含量,以及增加香味物质含量等方面,而关于烟草生物大分子物质结构、酶制剂的创制及酶催化转化机制的阐明等方面研究较少。因此,对于生物酶在烟草工业中的应用,今后的研究主要应从以下几个方面进行。

1)在烟草加工过程中,烟叶生物大分子物质会发生结构和形态的变化,从而导致研究者无法选择最合适的生物酶。所以,表征调制及醇化过程中烟草生物大分子物质的结构特征和存在形式,建立烟草中生物大分子物质的检测方法,对于生物酶的筛选、烟用生物酶的创制、生物酶特异性和效率提高等具有重要意义。

2)基于酶的结构特异性,开发具有自主知识产权的特异性催化烟草生物大分子物质的新型生物酶,提高酶的底物特异性,降低成本,加快产业化应用。

3)卷烟的加工环境具有高温、低水分、高渗透压及高烟碱等特点,这种环境抑制了现有生物酶的催化效率。针对该问题,可对现有生物酶进行基因工程改造使其适应卷烟环境,进而拓宽其使用范围,提高其催化效率。

参考文献:

- [1] 胡飞,段章群,王淮,等.生物酶法制备磷脂酰丝氨酸的研究进展[J].中国油脂,2012,37(6):54-58.
- [2] 费璠,刘昌伟,牛丽,等.酶及酶技术在茶叶深加工中的应用[J].食品与机械,2022,38(6):199-204,218.
- [3] 叶振敏,戴庆国.酶盐法羊毛纤维低温染色研究[J].化纤与纺织技术,2021,50(5):15-16,89.
- [4] 周正红,高孔荣,张水华.烟草中化学成分对卷烟色香味品质的影响及其研究进展[J].烟草科技,1997(2):22-25.
- [5] 姜林峰.烟梗中木质素及蛋白质的脱除[D].广州:华南理工大学,2017.
- [6] 张晓瑞,刘晓晖,付博,等.烟草中淀粉降解菌的筛选、鉴定及发酵工艺优化[J].食品与机械,2021,37(2):34-41.
- [7] 韩迎迎.果胶酶处理烟梗片基的研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [8] 陈兴,王文元,汪显国,等.烟叶纤维素降解菌的筛选、鉴定及其产酶条件优化[J].云南大学学报(自然科学版),2015,37(2):323-328.
- [9] 黄中,夏璠,钱玉梅,等.西柏三烯-4,6-二醇降解产香菌培养基条件优化[J].烟草科技,2017,50(12):55-60,69.
- [10] YE J B, ZHENG S S, ZHANG Z, et al. Bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* ATCC 23767 using tobacco waste extract as culture medium[J]. Bioresource Technology, 2019(274):518-524.
- [11] 王林,朱金峰,许自成,等.不同酶制剂对烤烟上部叶化学成分、游离态和糖苷结合态中性香气成分的影响[J].生物技术进展,2015,5(6):455-460.
- [12] 白家峰,梁德全,王宣静,等.酶解工艺及美拉德反应温度优化制备烟草花蕾香料[J].湖北农业科学,2021,60(22):143-147.
- [13] 夏炳乐,颜春雷,李敏莉,等.生物酶技术在烟草中的应用研究进展[J].烟草科技,2008(1):46-49.
- [14] 樊文举,高娟娟,张建新.外源酶制剂对烤烟烟叶化学品质的影响[J].福建农业学报,2017,32(6):652-659.
- [15] 樊文举,高娟娟,张建新.外源酶制剂对烤烟烟叶香气品质及燃烧特性的影响[J].西南农业学报,2018,31(5):948-957.
- [16] 雷亚芳.不同酶制剂与香料处理对烟叶品质及微生物多样性的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [17] LIN S S, ZHANG X M, SONG S Q, et al. Tobacco alkaloids reduction by casings added/enzymatic hydrolysis treatments assessed through Plsr analysis[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2016(75):27-34.
- [18] 朱晓兰,刘百战,王维妙,等.利用生物酶降解烟草果胶的研究[J].湖南农业大学学报(自然科学版),

- 2015,41(3):257-262.
- [19] ZHU X L, TAN L L, FENG G L, et al. Research on degradation of cellulose using enzyme treatment in flue-cured tobacco by ¹³C NMR spectroscopy [J]. *Cellulose*, 2015, 22(4):2693-2702.
- [20] 沙云菲,董惠忠,张耀,等. 降解上部烟叶大分子物质的复合酶配制与条件优化[J]. *中国烟草科学*, 2018, 39(3):80-88,97.
- [21] 郑娟娟. 陕西主栽品种烟叶品质特性及酶法调质研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [22] 罗丹,吴俊,全学军,等. 淀粉类酶降解烤烟中淀粉的研究[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2016, 30(7):64-68.
- [23] 李洪涛,管仕栓,邱承宇,等. 利用复合酶制剂改善烟叶枯焦气的研究[J]. *食品工业*, 2017, 38(12):56-60.
- [24] 王宝强,吴潇,季秀玲,等. 陈化烟叶产淀粉酶菌株的复筛及产酶条件优化[J]. *甘肃农业科技*, 2016(9):13-18.
- [25] 贺兆伟,奚家勤,李玉娥,等. 产果胶酶疣孢青霉菌株 TS63-9 发酵条件优化及其在烟草中的应用[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(4):686-690,696.
- [26] 迟广俊,宁伟,徐赫男,等. 制丝在线添加复合生物酶对膨胀烟丝感官质量及适用性的影响[J]. *中国烟草科学*, 2021, 42(2):91-97.
- [27] 杨云. 漆酶降解烟梗中木质素及其机理研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [28] 于建军,魏登辉,田斌强,等. 响应面法优化漆酶降解梗丝木质素的工艺[J]. *烟草科技*, 2017, 50(3):57-64.
- [29] 魏登辉. 梗丝木质素降解及其在卷烟工业中的应用[D]. 郑州:河南农业大学,2017.
- [30] 赵梦醒,王燕燕,王昊,等. 生物酶预处理对烟梗浆料纤维特性的影响[J]. *中国造纸*, 2020, 39(7):51-56.
- [31] 宋自力,廖头根,张伟,等. 白腐真菌血红密孔菌漆酶复合酶预处理烟梗丝的响应面法优化[J]. *菌物学报*, 2020, 39(5):923-936.
- [32] 宋自力,张伟,廖头根,等. 血红密孔菌高产漆酶菌株的筛选及其对烟梗的生物降解[J]. *菌物学报*, 2019, 38(3):381-392.
- [33] ZHU Y, OUYANG X P, ZHAO Y, et al. Oxidative depolymerization of lignin improved by enzymolysis pretreatment with laccase [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2018, 27(3):801-805.
- [34] 赵梦醒,王燕燕,畅婉清,等. 烟梗原料酶促打浆研究[J]. *天津科技大学学报*, 2021, 36(3):12-17,80.
- [35] 徐达,田耀伟,苏加坤,等. 不同复合酶在改善梗丝品质中的研究[J]. *中国酿造*, 2014, 33(11):113-117.
- [36] 杨乾棚,和智君,杨蕾,等. 复合酶条件优化对烟梗品质提升研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2016, 35(11):1206-1211.
- [37] 邹芳,赵娟,雷燕萍,等. 一株烟草秸秆降解菌的分离、鉴定及酶学性质研究[J]. *土壤*, 2016, 48(5):939-945.
- [38] HAN Y Y, LI J, WANG B, et al. Improved enzymatic hydrolysis of tobacco stalk by steam explosion and thread rolling pretreatments [J]. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2015, 49(2):181-185.
- [39] 黄天辉,桂金鹏,郑丽沙. 利用酶制剂改善再造烟叶品质研究进展[J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(10):102-108.
- [40] 马科,蒋登科,龚霜,等. 不同酶处理浓缩液对贵州烟草薄片品质的影响研究[J]. *轻工学报*, 2022, 37(1):62-67.
- [41] 许春平,刘远上,郝辉,等. 生物酶法降解烟梗末中果胶的研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2017, 36(2):194-199.
- [42] 郝辉,陈芝飞,宋金勇,等. 微紫青霉 (*Penicillium janthinellum* sw 09) 发酵产果胶酶降解烟梗果胶的条件优化及产物分析[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(6):2756-2762.
- [43] CHEN C, JIANG L F, MA G F, et al. Lignin removal from tobacco stem with laccase improved by synergistic action of weak alkali and tween 80 [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10(11):3343-3350.
- [44] 徐菲菲,田海龙,李东亮,等. 复合酶法降低烟草薄片刺激性的研究[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(14):227-233.
- [45] 王茜茜,刘恩芬,陈正春,等. 应用生物酶提高造纸法再造烟叶品质的研究[J]. *纸和造纸*, 2020, 39(6):15-20.
- [46] 刘恩芬,赵晓晨,王军,等. 造纸法再造烟叶生产过程中梗膏提质酶技术的应用研究[J]. *纸和造纸*, 2020, 39(3):27-31.
- [47] 刘彩红. 烟草废弃物酶解与 Maillard 反应及在烟草加香中的研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.
- [48] 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.
- [49] 刘珊,胡军,胡有持,等. 黄嘌呤氧化酶催化氧化降解β-胡萝卜素[J]. *烟草科技*, 2014(10):52-55.
- [50] 刘兴余,张杰,白若石,等. 生物酶选择性降低 NNK 研究[C]//上海市烟草学会. 上海市烟草学会 2015 年度获奖论文专刊. 上海:[出版社不详], 2016:44-48.
- [51] LIU L Z, YU W, LUO D, et al. Catalase nanocapsules protected by polymer shells for scavenging free radicals of tobacco smoke [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(32):5159-5165.
- [52] DONG C W, ZHENG Y D, TANG H Z H, et al. Highly efficient synthesis of 2,5-dihydropyridine using *Pseudomonas* sp. ZZ-5 nicotine hydroxylase immobilized on imobead 150 [J]. *Catalysts*, 2018, 8(11):548.
- [53] ZHENG Y X, WANG Y L, PAN J, et al. Semi-continuous

production of high-activity pectinases by immobilized *Rhizopus oryzae* using tobacco wastewater as substrate and their utilization in the hydrolysis of pectin-containing lignocellulosic biomass at high solid content [J]. *Biore-source Technology*, 2017(241):1138-1144.

[54] ZHANG G, LI S G, XU Y B, et al. Production of alkaline pectinase: A case study investigating the use of tobacco stalk with the newly isolated strain *Bacillus tequilensis* casmei-2-33[J]. *BMC Biotechnology*, 2019, 19(1):1-11.

Review on application of biological enzymes in tobacco industry

HUANG Shen¹, LU Yao¹, LIU Qiang², ZHAO Shengchen², CHEN Zhifei², MAO Duobin¹

1. *College of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;*

2. *Technology Center, China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 450002, China*

Abstract: Based on the significant effects of enzyme treatment on tobacco and its products, the research achievements of enzyme treatment in tobacco quality improvement, aroma production, and harm reduction in recent years were reviewed as follows. The weak links and problems in the research of biological enzymes were analyzed. Significant progress had been made in the research of enzymatic degradation of starch and pectin in tobacco leaves, with composite enzymes being more effective than single enzymes. The combination of laccase and protease had a better effect on treating tobacco stems than single. At the same time, treatments with acid, alkali, and steam explosion could significantly improve the enzymatic hydrolysis effect. In the process of reconstituted tobacco leaf concentrate using raw materials for tobacco thin slice preparation, biological enzymes were more effective, with advantages such as short processing time, high efficiency, and significant effects. In terms of aroma production, it was mainly achieved by producing substances that could participate in the Maillard reaction or catalyze the production of aroma precursors. In terms of harm reduction of cigarettes, it was mainly achieved by reducing the content of tobacco specific Nitrosamine and smoke free radicals and other harmful substances. In the future, in-depth research can be carried out from the aspects of structural characterization and characteristics of tobacco biomacromolecules, creation of tobacco enzyme preparations and analysis of catalytic mechanism, so as to further promote the research and application of biological enzymes in tobacco aroma enhancement, quality improvement and harm reduction.

Key words: biological enzymes; tobacco industry; tobacco leaf treatment; tobacco stem treatment

(责任编辑:吴晓亭)