

# 国外烟草活性成分提取及纤维材料利用现状与展望

池哲翔<sup>1</sup>, 廖敏<sup>2</sup>, 史尚<sup>3</sup>, 李声毅<sup>4</sup>, 廖芸<sup>2</sup>, 丁冬<sup>1</sup>

1.国家烟草专卖局, 北京 100045;

2.江西省烟草公司赣州市公司, 江西 赣州 341000;

3.徐州医科大学 管理学院, 江苏 徐州 221004;

4.江西中烟工业有限责任公司 营销中心, 江西 南昌 330096

**摘要:** 针对烟草废弃生物资源多用途开发与利用的关键问题, 从烟草活性成分提取、纤维材料利用方面对国外技术研发现状进行梳理, 指出: 烟草活性成分包括烟碱、茄尼醇、多酚、蛋白、四酰基蔗糖酯和烟草类活性成分(叶绿体、线粒体)等, 其中, 烟碱、绿原酸、茄尼醇含量和附加值均较高, 且提取工艺较为简单, 在农药、医药、烟草制品添加物等领域的市场空间较大, 国外已广泛实现产业化运营; 纤维材料的利用包括动物饲料、纤维材料(纸张、纤维板、刨花板和硝化纤维)、低聚木糖和生物炭有机肥等, 其中, 制备生物炭有机肥、纸张和纤维板是其规模化利用的主要研究方向, 技术较为成熟, 但成本相对较高, 目前国外已有产业化的初步探索。未来, 在进一步推动烟草多用途利用新兴产业发展时, 围绕新型烟草制品添加物、医药用途场景, 烟碱、茄尼醇和烟草致香成分提取是重要研究方向; 围绕饲料应用场景, 烟草新品种培育是重要发展方向; 围绕大农业应用场景, 基于烟草废弃物的多功能耦合的生物炭有机肥是重要发展方向; 此外, 在成本许可范围内, 增强型纸张和纤维板未来也将是烟草废弃物多元化利用的重点研究方向之一。

**关键词:** 烟草; 多用途利用; 活性成分提取; 纤维材料利用

**中图分类号:**           **文献标识码:** A

## Overview and prospects of foreign tobacco resource utilization technologies on the extraction of active ingredients and utilisation of fiber materials

CHI Zhexiang<sup>1</sup>, Liao Min<sup>2</sup>, Shi Shang<sup>3</sup>, Li Shengyi<sup>4</sup>, Liao Yun<sup>2</sup>, Ding Dong<sup>1</sup>

1.State Tobacco Monopoly Bureau, Beijing 100045, China;

2.Ganzhou Branch of Jiangxi Tobacco Corporation, Ganzhou 341000, China;

3.School of Management, Xuzhou Medical University, Xuzhou 221004, China;

4.Marketing Center, Jiangxi China Tobacco Industry Co., Ltd., Nanchang 330096, China

**Abstract:** Aiming at the key issues of the development and utilization of tobacco biological resources for non-cigarette manufacturing, the current status of foreign technology research and development is sorted out from the aspects of extraction of tobacco active substances and utilization of fiber materials, pointing out that: the active components of tobacco include nicotine, cannabinoid alcohol, polyphenols, proteins, tetraacyl sucrose esters and

tobacco tissues (chloroplasts, mitochondria), etc.. Among these, the content and added value of nicotine, chlorogenic acid and cannabinoid alcohol are relatively high, and the extraction technology is more simple. These components have a significant market potential in the fields of pesticides, pharmaceuticals, and tobacco product additives, and have already been widely commercialized abroad. The utilization of fiber materials includes animal feed, fibrous material (paper, fiberboard, particleboard, nitrocellulose), oligosaccharides and biochar fertilizers. The primary directions for large-scale utilization of these materials are the production of biochar-based organic fertilizers, paper, and fiberboard, which are supported by relatively mature technologies. However, the cost associated with these processes remains relatively high, and there have been initial explorations into industrialization.. In the future, in order to further promote the development of the emerging industry of multi-purpose utilization of tobacco, in the scenario of novel tobacco product additives and pharmaceutical use, the extraction of nicotine, cannabiniol and aroma-causing components of tobacco is an important research direction; in the scenario of feed application, the cultivation of new varieties of tobacco is an important direction of development; in the scenario of large-scale agricultural application, multi-functional coupling of organic fertilizer based on bio-carbon from tobacco waste resources is an important direction of development. In addition, within the scope of cost permitting, reinforced paper and fiberboard will also be one of the key R&D directions in the future.

**Keywords:** tobacco; multi-functional utilization; active ingredient extraction; fiber materials utilization

收稿日期: 2024-04-02; 修回日期: 2024-07-26; 出版日期:

基金项目: 河南省重点研发与推广专项项目(602024AS0150); 国家烟草专卖局重点研发项目(110202102048, 110202102051); 国家烟草专卖局、中国烟草总公司首席科学家创新专项项目(602022CK0550)

作者简介: 池哲翔(1989—), 男, 国家烟草专卖局经济师, 博士, 主要研究方向为烟草行业产品质量监督、质量基础设施与科技创新评价。E-mail:chizx12@126.com

通信作者: 丁冬(1987—), 男, 国家烟草专卖局高级经济师, 博士, 主要研究方向为三农问题、烟草经济。E-mail:dingdong0923@126.com

## 0 引言

烟叶是烟草工业的重要原料, 主要用于生产传统烟草制品和新型烟草制品。据报道, 2023年, 全球烟叶产量为 5216 万担(除中国外), 同比增长 15.2%<sup>[1]</sup>。但自 2000 以来, 全球烟草使用率和吸烟率呈持续下降态势, 造成了烟叶过剩问题<sup>[2]</sup>, 同时其作为植物本身原料属性的发展空间也没有得到充分发挥。目前, 烟草多用途利用已成为我国烟草产业技术研发和储备的重点领域之一, 各大烟草企业纷纷致力于烟草新用途的开发和利用<sup>[3]</sup>。当然, 烟草多用途利用也早已引起国外学者们的高度重视, 雷诺兹烟草公司和英美烟草公司分别在 2008 年和 2014 年启动和实施了烟草重组项目和烟草多元化项目相关战略研究, 积极谋划布局烟草在卷烟以外的其他应用场景<sup>[4]</sup>。有关烟草的多用途利用, 在培养基制备方面, 国外学者经微生物发酵制备了高活性的羧甲基纤维素酶和微晶纤维素酶<sup>[5-6]</sup>; 在生物燃料制备方面, 采用直接或生物技术改良

后提取获得了烟草油脂和种子油<sup>[7]</sup>，采用热解法或热催化得到组成不同的热解油<sup>[8-10]</sup>和燃料炭<sup>[11]</sup>，采用发酵法得到燃料乙醇<sup>[12-14]</sup>、甲烷<sup>[7, 15]</sup>、氢气<sup>[16]</sup>；在堆肥制备方面，主要是将烟草与鸡粪、猪粪、葡萄渣、橄榄渣或苹果等混合后进行共堆肥，获得有机肥<sup>[17-20]</sup>；在多孔材料制备方面，可直接将烟草作为吸附材料<sup>[21]</sup>，或经水热反应制备碳量子点<sup>[22]</sup>、经热解或活化热解制备比表面积较大的多孔碳材料等<sup>[23-24]</sup>。

为整体把握国外在烟草多用途利用领域的研发态势，综合研判今后的发展方向，本文着重对国外在烟草活性成分提取、纤维材料利用方面的研究进展进行综述，以期为我国在该领域技术路径的选择和攻关提供借鉴。

## 1 活性成分提取

烟草本身含有众多活性成分，目前已探明的成分多达 5229 种，包括生物碱类、蛋白质、萜类、糖类、芳香类和多酚类等。这些成分的含量与烟草的种类及其在烟草植株中的具体部位密切相关<sup>[25]</sup>。在这些活性成分中，生物碱类中的烟碱（尼古丁）和烟草多酚中的绿原酸含量尤为显著<sup>[25]</sup>。因此，烟碱和绿原酸这两种活性成分的提取成为国外技术研发的重点，其次是茄尼醇的提取。近些年，美国的 E-LiquiTech、Liquid Nicotine Wholesalers、Nicotine River、AmeriNic，英国的 BOC Sciences、TCI America、Biosynth Carbosynth 等公司，已经将烟碱及其衍生物（如烟碱盐等）、电子烟油、茄尼醇等活性成分实现产业化运营<sup>[3]</sup>。除此之外，在早期，以烟草为原料，国外学者的研究还涉及烟草蛋白、四酰基蔗糖酯、类活性成分（叶绿体、线粒体）等方面，但仅限于实验室方法开发阶段，尚未实现工业化应用<sup>[26-30]</sup>。

### 1.1 烟碱

烟碱是烟草中最主要的生物碱，占其总生物碱的 95%左右，具有杀虫和抗菌特性，可作为一种广谱的绿色生物农药使用，也可通过复配制成兼具杀虫、除草及植物生长调节功能的药剂，（如德国拜耳作物科学公司开发的烟碱类杀虫剂吡虫啉）。此外，烟碱及其衍生物（如烟碱酸）在医学领域也有广泛的应用，可用于治疗包括帕金森、精神分裂症、认知功能障碍、运动障碍等在内的多种疾病<sup>[31]</sup>，在 2017 年，研究人员就开始尝试采用烟碱治疗患者肺结节病（一种肺部慢性炎症）<sup>[32]</sup>；此外，高纯烟碱还可用于戒烟产品，制备雾化类烟草制品的烟油等。

烟草源烟碱的市场前景十分广阔，工业上主流的烟碱提取技术是在碱性条件下采用正己烷或汽油抽提，固液分离后再浓缩，经水萃取和分离，可获得 40%烟碱，进一步经过减压蒸馏、分馏等纯化工艺，可获得纯度高于 98%的烟碱<sup>[4]</sup>。此外，有关烟碱提取新技术的研究还涉及超临界或亚临界溶剂提取、微波提取、热提取及分离纯化研究等，其目的主要是提高烟碱的提取

率和纯度。

在超临界或亚临界溶剂提取技术方面，早在 1998 年，J. Rincon 等<sup>[33]</sup>采用超临界 CO<sub>2</sub> 技术提取烟草中的烟碱，但收率较低（24%~43%），且烟碱在提取物中占比也不高（0.57%~1.00%）。至 2021 年，G. J. Tita 等<sup>[34]</sup>对超临界 CO<sub>2</sub> 技术的可行性再次进行了评估，发现压力是影响提取率及提取选择性（茄尼醇和烟碱）的关键因素，且在 37 MPa 时烟碱的提取率最高（2.10 g/kg 烟草废弃物）。M. Banožić 等<sup>[35]</sup>对比研究了亚临界水和超临界 CO<sub>2</sub> 提取技术对烟草中烟碱提取性能的影响，发现超临界 CO<sub>2</sub> 技术适用于游离态烟碱的提取，而亚临界水技术适用于带电荷形态的烟碱提取，将两者结合使用（两步法）能够提高烟碱的整体提取效率。

在微波提取技术方面，溶剂极性和烟叶含水量是影响烟碱提取率的关键因素。L. K. Ng 等<sup>[36]</sup>使用微波技术提取烟叶中的烟碱时发现，同等条件下，极性溶剂（甲醇）的提取效率优于非极性溶剂（异辛烷）；而当提取剂为异辛烷时，烟叶含水率（5%~20%）的影响更为显著，随含水率的增加（3%~13%），烟碱的收率从 3%提升至 70%。除烟叶原料外，随着新型卷烟制品的快速发展，国外学者也开始关注从废弃烟弹中提取烟碱，并采用生物技术对提取技术路线进行了改良。如 A. Buntic 等<sup>[6]</sup>先采用极暗黄链霉菌 CKS7 发酵废弃烟弹，再进行微波提取，可将提取物中烟碱的浓度由 7.14 μg/mL（直接微波辅助水提法）提升至 7.26 μg/mL。

在热提取技术方面，国外主要聚焦于流化床工艺设备的开发，以解决传统溶剂提取工艺技术普遍存在的成本高、环境不友好等问题。2015 年，M. M. Hossain 等<sup>[37]</sup>开发了机械流化床热提取技术，400 °C 条件下烟碱的回收率高达 100%，但烟碱在提取得到的生物油中的含量整体偏低（<3%），须经后续浓缩处理（50 °C 干燥），才可将其浓度提升至 28%（此时回收率仅为 80%）。为进一步提升烟碱在烟叶一次提取生物油中的含量，M. M. Hossain 等<sup>[38]</sup>对工艺装置的冷凝器进行了改进，在机械流化床的后端依次增设热、冷两种冷凝器，烟碱的初始浓度得到显著提高（为 20%），且回收率为 90%；若仅收集部分热裂解温度段的馏分，还可进一步提升一次生物油中的烟碱浓度，如在 260~275 °C 馏分段所收集的生物油中，烟碱的浓度高达 56%，但此时烟碱回收率仅为 21%。

在分离纯化技术方面，国外学者对于如何纯化提取物中烟碱的关注度相对偏少，研究报道不多，目前主要有离子交换树脂和柱色谱纯化两种方法。1998 年，A. Lucas 等<sup>[39]</sup>基于氢型强酸离子交换树脂和氨水，开发了一种烟碱纯化方法，并建立了 5 个平衡等温吸附线理论方程。至 2018 年，R. M. Fathi 等<sup>[40]</sup>报道了一种柱色谱纯化方法，以乙醇为流动相，能够从烟叶提取物（总烟碱为 4.19%）中分离得到 4.006%的烟碱，分离纯化率较高。

## 1.2 茄尼醇

茄尼醇主要存在于烟叶中，约占烟草总重的 0.3%~3.0%。茄尼醇是一种不饱和的聚异戊二烯醇，具有很强的抗癌生物活性，其高纯产品（纯度>90%）是合成维生素 K2、辅酶 Q10、抗溃疡药物、抗癌药物等不可替代的天然原料。与烟碱类似，国外学者对于茄尼醇的研究也主要集中于新型的提取方法（超临界 CO<sub>2</sub> 提取技术及微波提取技术），目的也是提高茄尼醇的回收率及纯度。

2007 年，A. Ruiz-Rodriguez 等<sup>[41]</sup>开发了超临界 CO<sub>2</sub> 提取茄尼醇的技术，在提高提取率的同时可有效降低烟碱在提取物中的含量，在 25 °C、8 MPa 条件下，提取物中茄尼醇/烟碱比最高可达 18.91，但提取物富含维生素 E，后续仍需进一步除杂纯化。2024 年，R. S. Edwin 等<sup>[42]</sup>基于微波-超声波辅助萃取技术开发了茄尼醇的连续提取工艺，可将提取时间由传统技术的 1 h 缩短至 31.5 min，茄尼醇粗品收率为 3.0%（质量分数），经硅胶柱色谱除杂后，纯度可达 85%。在原料创新方面，P. A. Emachado 等<sup>[43]</sup>开发了低生物碱含量烟草新品种 MD-609LA，提取烟草蛋白后，再从残余物（生物质和叶绿体）中提取茄尼醇，发现微波辅助技术的提取效果明显优于传统的热回流技术和超声辅助提取技术，每 100 kg 鲜烟叶可提取 43.4 g 茄尼醇，进一步提高了烟草多用途产业链（烟草蛋白和茄尼醇联产技术）的整体盈利能力。

## 1.3 多酚类物质

烟草多酚具有一定的抗氧化或自由基清除活性，包括隐绿原酸、新绿原酸、烟花苷、芸香苷及东莨菪碱等，其含量因原料种类而异。烤烟、香料烟和晾晒烟的总酚含量分别为 18~41 mg/g、5~27 mg/g 和 0.5~3.0 mg/g<sup>[44]</sup>，烤烟和香料烟是烟草多酚提取的主要原料，靶标物主要有黄酮类化合物、绿原酸和咖啡酸等。目前，研究人员对于烟草多酚的研究主要涉及新型提取（以超声辅助提取为主）及分离纯化技术（柱层析），旨在提升多酚类物质的提取率<sup>[45-49]</sup>。

I. T. Karabegovic 等<sup>[45]</sup>研究发现，总酚和黄酮类化合物的提取量与所采用的提取技术无关，主要受烟草类型、溶剂种类及提取温度的影响，但较高温度或超声提取会导致一些靶标成分发生氧化或降解。M. Docheva 等<sup>[46]</sup>采用超声辅助提取技术得到了富含芦丁（黄酮苷，Flavonoid Glycosides Rutin）和山奈酚-3-芦丁苷（Kaempferol-3-rutinoside）的烟草提取物，粗提物中黄酮的含量为 3.9 mg/g，柱色谱纯化后，回收率为 47%。M. Banozic 等<sup>[47]</sup>也从烟草废弃物中提取获得了绿原酸、咖啡酸、芦丁和茄尼醇等活性成分，含量分别为 3.64~804.20 μg/mL、2.34~10.80 μg/mL 和 11.56~93.70 μg/mL 和 294.9~598.9 μg/mL，并且发现黄酮类的含量和抗氧化生物活性也与超声环境条件、烟草废弃物类型密切相关，与 I. T. Karabegovic 等<sup>[45]</sup>的研究结果相一致。

除了上述主流技术外，针对烟草中的类黄酮，M. Docheva 等<sup>[48]</sup>研究显示，传统的溶剂提取也可实现靶标成分的完全提取，柱层析纯化后，类黄酮的含量为 8.8%~14.3%，且烟碱和酚酸等杂质在提取物中的含量相对较低（分别 $<0.3 \mu\text{g/mL}$  和 $<1.0\%$ ）；所得类黄酮具有优异的自由基清除能力（IC<sub>50</sub> 为 35.0~64.6  $\mu\text{g/mL}$ ）。

在分离方法方面，柱层析是烟草黄酮或类黄酮等活性成分使用率最高的方法，但对于烟草中部分含量较低但具有高附加值的黄酮类物质（如芦丁等）的使用效果欠佳。为此，I. Tsibranska 等<sup>[49]</sup>开发了一种基于耐有机溶剂膜的纳滤技术，能够从烟叶乙醇提取物中有效分离获得以芦丁为主的黄酮类化合物，芦丁截留率约为 88%。

#### 1.4 烟草蛋白

从植物中提取蛋白质是未来食品研究的一项重要课题，据调研<sup>[45]</sup>，烟草富含蛋白质（约为 12.2%），尤其以白肋烟最高（为 20.48%）。烟叶中的蛋白分为可溶性和不溶性两种，可溶性蛋白又分为 F I 蛋白（一种单独的叶绿体蛋白）和 F II 蛋白（其他可溶性蛋白质的复合物），各自约占 50%。烟草蛋白价值相对较低，不适宜作为主要靶标物进行产业化提取，但可作为副产品来提升整个技术链的经济性。国外对该领域的研究主要涉及烟叶蛋白或功能性蛋白（磷酸化蛋白）的提取及营养价值剖析等方面。上世纪 70 年代，T. Tso 等<sup>[50]</sup>开发了均质化烟叶烘烤工艺，烘烤前即可实现对烟叶蛋白的分离，但目的是提高卷烟抽吸的安全性，而不是为了获得蛋白。80 年代，S. D. Kung 等<sup>[26]</sup>开始采用化学和生物学方法研究烟草蛋白的营养价值，发现其营养价值与牛奶相当，处于植物源蛋白的前列，其中，F I 蛋白可作为谷物消费者极好的膳食补充剂使用。至 21 世纪，为更高效提取烟叶蛋白，H. Fu 等<sup>[51]</sup>开发了磷酸盐缓冲体系（ $\text{Na}_2\text{HPO}_4\text{-KH}_2\text{PO}_4$ ），可规模化提取烟草蛋白（不含烟碱），烟叶的处理量为 60 kg/h，每克鲜烟叶可提取可溶性蛋白 12.85 mg，磷酸冲洗去除烟碱，回收率高达 94.5%。除直接提取烟叶蛋白外，J. Fila 等<sup>[52]</sup>还研究了烟叶蛋白的磷酸化过程，依次采用 TCA/丙酮提取总蛋白、金属氧化物/氢氧化物亲和色谱与氢氧化铝基质富集步骤，可从烟草成熟花粉的粗蛋白得到磷酸化蛋白。

#### 1.5 四酰基蔗糖酯

四酰基蔗糖酯是鲜烟叶表面角质蜡的主要成分，具有抗菌活性，也是烟草风味成分的前体物，在医药及香料领域具有一定的应用前景。国外研究者对其的相关研究不多且主要集中于分离技术方面（包括凝胶过滤-分配色谱法、硅胶柱和超临界  $\text{CO}_2$  提取技术）等。1985 年，R. F. Severson 等<sup>[53]</sup>开发了凝胶过滤-分配色谱法，采用羟丙基葡聚糖凝胶 LH-20 对烟叶表面提取物

进行分馏，得到 6 组蔗糖酯异构体，相互间差异为 14 amu。随后，D. A. Daneshmand 等<sup>[27]</sup>采用硅胶柱分离得到了四酰基蔗糖酯，回收率为 99%。随着现代分离技术的发展，2005 年，M. Ashraf-Khorassani 等<sup>[54]</sup>开发了超临界 CO<sub>2</sub> 提取技术，发现可通过调节 CO<sub>2</sub> 的浓度实现蔗糖酯的高效分离，CO<sub>2</sub> 的适宜浓度应高于 0.73 gm/mL。

## 1.6 其他药用成分

烟草次生代谢产物丰富，是传统的植物源农药资源，烟草提取物及其热解物均具有一定的抑菌和杀虫活性，在新型植物源农药或兼具有杀虫功能复合材料研发方面也具有一定的应用潜力。对于烟草本源提取物，V. Popova 等<sup>[55]</sup>研究发现，烟草精油、浸膏、树脂等产品对表皮葡萄球菌和金黄色葡萄球菌均具有一定的抗菌特性。B. Missaoui 等<sup>[56]</sup>采用蒙脱石/壳聚糖/醋酸纤维组成的纳米复合材料对含有烟碱的烟草精油进行封装，制备得到一种具有杀虫功能的纳米薄膜材料，可用于谷物的虫害防护。烟草防御所产生的化合物也具有一定的医药或农药活性，M. Murata 等<sup>[57]</sup>从烟草花叶病毒侵染的烟叶中分离得到一种抗虫诱导剂（Loliolide），能够有效降低番茄二斑叶螨存活率、虫卵沉积量及普通地老虎斜纹贪夜蛾幼虫的存活率，且对食草动物无毒性。在医药用途方面，A. A. Baxter 等<sup>[58]</sup>首次在烟草中发现一种能够杀死癌细胞的植物防御素 NaD1，其能够精准识别癌细胞，通过与其隔膜形成钳形结构来捕获并破坏这些细胞，从而有效抑制癌症的发展。

## 1.7 烟草类活性成分

除上述烟草固有化学成分的直接提取利用外，烟草所含的类活性成分，如叶绿体、线粒体等植物组织也具有一定的生物活性。但针对烟草类活性成分的研究仅在上世纪 50 年代受到国外学者的关注，研究内容主要涉及烟草组织的酶活性，拓宽了烟草资源的利用途径，对于植物源新型酶制剂的开发也具有一定的参考价值。A. T. Jagendorf 等<sup>[28]</sup>采用离心法从烟叶中分离纯化得到的烟草叶绿体，富含过氧化氢酶和细胞色素氧化酶，具有较高的 Hill 反应活性，且在预处理方面，常规搅拌机处理优于研钵和杵研磨，能够最大程度保留叶绿体的完整性。W. S. Pierpoint<sup>[29-30]</sup>以烟叶为原料依次经介质研磨、离心，得到线粒体制剂，制剂中含有 1/3 的总叶绿素和 15% 的总蛋白质氮，并且富含琥珀氧化酶，对三磷酸循环中的大多数酸性化合物均具有氧化性能，该线粒体制剂还具有一定的乙醇酸氧化酶和延胡索酶活性。

综上所述，对于烟碱、茄尼醇、多酚类物质和四酰基蔗糖酯，相关研究主要集中于提取方法的开发方面，包括超临界或亚临界溶剂提取技术、微波提取技术、热提取技术、超声提取技术等，目的在于寻求适宜的方法来提提升靶标成分的提取率和纯度。而对于烟草蛋白和其他药用

成分（烟草精油、浸膏、树脂等）的研究主要集中于其生物学性能（营养价值、抑菌和杀虫活性等）方面，尚处于探索阶段。在单一活性成分方面，烟碱和茄尼醇的提取技术较为成熟，其他活性成分尚处于实验室阶段。除此之外，国外学者在早期还探索了烟草活性组织（叶绿体、线粒体）的提取方法（主要是离心分离），并确定了线粒体内部酶具有生物活性。未来，随着合成生物学技术的快速发展，烟草类活性成分的开发将可能为今后新型酶制剂的研制提供新的路径。

## 2 烟草纤维材料利用

相比烟草中可提取的活性或类活性成分，烟草纤维材料在整个烟草基质中占有更大的比重，国外对其综合利用的方向包括直接利用（如制备动物饲料、制备纸张和纤维板等）、经转化后得到其衍生靶标物进行利用（如降解为低聚木糖、热解制备生物炭有机肥或生物杀虫剂等）。

### 2.1 制备动物饲料

烟草富含蛋白质、糖分和矿物质元素（如钾、钙、镁、铁、硼、锰等），且纤维质量好，在饲料制备方面具有天然优势。国外对此的研究包括烟草源直接饲料及烟草衍生饲料两种，产品研发的目的主要是降低动物的喂食成本。对于直接饲料，A. Fatica 等<sup>[59]</sup>研发出低烟碱烟草品种 Solaris，整株经切碎、植物乳杆菌发酵后即可添加于奶牛的基础饲料，喂食 45 d，小牛的身体状况、粪便稠度、运动能力及繁殖性状等指标均不受影响。对于衍生饲料（或间接饲料），烟草仅充当培养基，如以烟草为载体可获得供动物饲用的烟草花叶病毒蛋白，但其氨基酸种类与酪蛋白相似，缺乏组氨酸、蛋氨酸和赖氨酸 3 种必需氨基酸<sup>[60]</sup>。J. P. Chandler 等<sup>[60]</sup>研究表明，通过给小鼠喂食烟草花叶病毒蛋白，同时辅以额外 3 种必需氨基酸，可以满足小鼠的氨基酸营养需求，且这种饲料能够有效替代常规饲料中 20%的成分。

### 2.2 制备纤维材料

烟秆主要化学成分与木材相似，其灰分和抽提物的含量甚至比木材高，木质素及综纤维的含量与阔叶材接近，是较好的造纸原料<sup>[61]</sup>。烟秆的木质化纤维扁而宽，易扭曲，纤维壁薄柔韧性好，因此也是纤维板的优良原料<sup>[62]</sup>。除了整体利用外，部分学者还从烟秆中提取得到纤维或经转化得到功能性纤维，进一步拓宽了烟草纤维在高端产品中的应用途径<sup>[63-64]</sup>。

在造纸方面，早在 1996 年，S. Kajita 等<sup>[65]</sup>就采用基因工程技术通过抑制 4-香豆酸:辅酶 A 连接酶（4CL）的活性来调控烟草植株的木质素含量。随后，S. Kajita 等<sup>[66-67]</sup>研究确认了转基因烟草植株木质素用于造纸的可行性，且转基因烟草原料更易于脱木质素，在确保纸张强度和



光学特性不变的前提下，可明显改善纸浆的收率和可漂白性。2022 年，日本烟草公司开始与当地的纸品公司合作，以烟梗为原料来制备传统和纸，尚处于工业化的早期阶段<sup>[4]</sup>。伊朗也探索了烟秆等废弃物用于造纸的可行性，2011 年，J. Shakhes 等<sup>[68]</sup>研究显示，在传统碱法制浆的基础上添加少量蒽醌（质量分数 0.2%）有利于降低浆渣废料的产生量和纸浆卡伯值，并可提高细浆得率和亮度，具有优异的加工性能（裂断长和撕裂指数）。

在纤维板或刨花板方面，早在 2000 年，R. C. Castro 等<sup>[69]</sup>就曾以烟秆为原料、酚醛树脂为粘结剂探索制备低密度、中密度及高密度纤维板，并试图将其商业化。2017 年，M. Akgul 等<sup>[62]</sup>研究发现，在制作密度纤维板时，烟秆可替代 20%木材，且所得产品的弯曲强度、弹性、厚度膨胀、表面硬度指标能够满足一般的用途要求。2022 年，J. P. Jimenez 等<sup>[70]</sup>研究了烟秆和构树木片生产刨花板的可行性，发现二者单独或混合配比均可制备得到适用于干燥条件的刨花板，其中，烟秆与构树木片以 75/25 的质量比混合，所得产品不仅甲醛释放量低，而且对白蚁的抵抗力也得到提高。

在纤维或功能性纤维提取或制备方面，S. Ovali<sup>[69]</sup>采用水沤法仅需三周即可从烟秆中分离得到烟草纤维，产物富含纤维素（质量分数 56.6%）且具有较高的拉伸强度（113.4 MPa）和良好的结晶度指数（70%），有助于其与复合材料基体中的其他纤维粘合，在聚合物基复合材料、纺织品等领域具有一定的应用前景。在功能化纤维制备方面，R. Muvhiiwa 等<sup>[70]</sup>以含水率 10.17%（质量分数）的烟秆为原料，依次经苏打蒸煮制浆、次氯酸钙漂白、消化处理等步骤，获得了不同类型的硝化纤维，其氮含量为 11.0%~11.5%（体积比，采用在丙酮中的溶解性计）。

### 2.3 制备低聚木糖

除了烟草活性成分或组织的提取分离外，也可采用酶制剂对烟秆或烟秆预处理产物进一步酶解，延长技术链来制备化学成分单一的化工原料（如低聚木糖等）。O. Akpinar 等<sup>[71]</sup>以烟秆为原料，依次经碱液水提、酶解，制得低聚木糖，发现所得低聚木糖的产量和种类分布随所用酶来源的不同（长木霉菌和黑曲霉）而异，黑曲霉源木聚糖酶的酶解量稍高，且产品富含木二糖和木三糖，而长木霉菌源木聚糖酶所得产品则富含木糖和木二糖。随后，O. Akpinar 等<sup>[72]</sup>还对比研究了酸解和酶解对木聚糖降解性能的影响，发现两种水解条件下低聚木糖的收率分别为 11%和 13%，且酸解时间（0.5 h）显著比酶解（24.0 h）短，但酸解会产生糠醛和单糖，将大幅度增加后续产品的纯化难度。近期，M. B. Santana Jr.等<sup>[73-74]</sup>开发了一种基于水热预处理技术来获得烟秆低聚木糖的方法，低聚木糖的收率高达 49.54%（在提取溶液中的浓度为 11.11 g/L），处理 1000 kg 的烟草材料可产出 56 kg 的低聚木糖，同时固相物经发酵还可联产得到

78 kg 的琥珀酸，具有较好的工业应用前景。

## 2.4 制备生物炭肥料

除堆肥化利用外<sup>[17-20]</sup>，烟草废弃物还可用于制备生物炭并作为土壤改良剂使用，也是其重要的农业利用途径。生物炭是在厌氧或无氧条件下对生物质进行热解得到的一类固体材料，含有大量氧、氢、碳、氮元素，富含羧基、酚羟基、羟基、脂族双键等官能团，且具有丰富孔隙结构，在改善土壤理化性状、调控土壤微生物数量及群落结构组成、增加土壤养分吸持、提高作物产量、增碳减排及污染土壤修复等方面均表现出巨大的应用潜力<sup>[75]</sup>。

国外对于生物炭的研究主要集中于制备方面，且比较关注生物炭材料中营养元素如氮、磷和钾的含量。R. K. Sharma 等<sup>[76]</sup>研究了气氛（有氧、无氧）对烟草原料热解的影响，发现有氧气氛不适合高温生物炭制备，如当氧气为 5%（体积分数）、温度高于 600 °C 时基本得不到生物炭；在无氧条件下，400 °C 所得生物炭的比表面积最大，为 8 m<sup>2</sup>/g，但收率随温度升高而极速下降，当温度高于 450 °C 时，生物炭的收率基本上稳定在 22% 左右。V. Strezov 等<sup>[77]</sup>采用慢速热解（5 °C/min）在 500 °C 制备出富含磷、钾的生物炭，钾的含量可达 16.1%。除了烟草废弃物原料外，B. Onorevoli 等<sup>[78]</sup>还以烟草种子提取后的残渣为原料，采用快速热解（100 °C/min 的升温速率）技术在 700 °C 热解 10min 也可制得生物炭，收率为 25.5%，其中氮、磷和钾的含量分别为 4.5%、3.4% 和 4.7%。

## 2.5 制备生物油杀虫剂

烟草生物质通过热解可以得到生物油、生物炭、气体等产物，生物油除了用于燃料用途外，还具有一定的杀虫和抑菌特性，未来可有望应用于新型天然生物农药的制备<sup>[79-80]</sup>。C. J. Booker 等<sup>[79-80]</sup>研究发现，在最优条件下（500 °C、蒸汽停留时间 5 s）所得烟草生物油的收率为 43.4%，且在 350~600 °C 温度和 5~17 s 停留时间范围内得到的生物油对科罗拉多马铃薯甲虫（*Leptinotarsa decemlineata* L.）和三种有害微生物（*Clavibacter michiganensis*、*Streptomyces scabies* 和 *Pythium ultimum*）均表现出较好的农药特性，即使通过液液萃取法去除生物油中的烟碱后，该生物油对科罗拉多马铃薯甲虫仍具有较高的致命性，对三种微生物的生长有一定的抑制作用。

综上所述，烟草纤维材料的综合利用按照最初环节是否发生化学转化的角度划分，包括直接利用和转化后利用两种。直接利用，包括制备动物饲料和制备纤维材料；转化后利用包括制备低聚木糖、生物炭有机肥和生物油杀虫剂。动物饲料的研发主要为了降低动物的喂饲成本，涉及新品种烟草的整株利用或用于生产烟草花叶病毒蛋白。制备纤维材料主要包括造纸或制备

纤维板，目的在于实现烟草废弃物尤其是烟秆的规模化利用，尚处于产业化早期阶段。当前，也有学者开始提取烟草纤维或将其进一步转化为功能性纤维，探索其在高端产品应用的可能性。在低聚木糖制备方面，酶解法更具优势，低聚木糖联产其他产品如琥珀酸是未来发展的方向。在热解利用方面，对于固相产品，国外更为关注生物炭的营养价值，即生物炭中氮、磷、钾的含量；对于液相产品，则更为关注生物油在新型天然生物农药（尤其是杀虫和抑菌方面）研发方向的潜能。

### 3 结论与展望

烟草活性成分的提取主要涉及烟碱、茄尼醇、多酚类物质、烟草蛋白、四酰基蔗糖酯、其他药用成分及类活性成分（叶绿体、线粒体）等，对于单一化学成分，应用最多的提取分离技术是超临界 CO<sub>2</sub> 技术和微波提取技术；而对于烟草蛋白和其他药用成分，主要侧重于其生物学性能的研究，如烟草精油的抑菌作用、植物防御素 NaD1 分子的抗癌活性、Loliolide 的杀虫活性等。烟草纤维材料的利用主要涉及制备动物饲料、制备纸张和纤维板，以及经转化制备低聚木糖、生物炭和生物油等。其中，动物饲料主要是采用基于烟草植株的乳杆菌发酵物或烟草花叶病毒蛋白等成分，这些成分可以直接作为饲料使用，或者部分替代传统饲料原料。纸张和纤维板的应用主要是利用烟秆独特的纤维形态，但造纸条件相对苛刻，纤维板的参数特性也并不突出。低聚木糖的制备方法中酶解法最具优势。生物炭有机肥的制备则比较关注氮、磷和钾等营养元素的含量。而热解制备得到生物油，则更侧重其农药特性的研发，如杀虫或抑菌活性等。

未来，针对烟草活性成分的提取与利用，烟碱和烟草致香成分的提取，相比于其他天然植物具有一定的差异化特色，且可作为添加物应用于传统卷烟和以电子烟为代表的新型烟草制品等全品类烟草制品，产业化潜力较大。此外，烟碱、茄尼醇和致香成分的衍生物或深加工产品在日化和医药保健品等方面也具有一定的应用前景。针对动物饲料，相关研究还相对偏少，综合考虑实际使用场景和产量等因素，相比烟草花叶病毒蛋白，动物饲用用途烟草新品种的开发是未来发展的重点方向。针对烟草生物炭有机肥，制备技术相对成熟，拓展生物炭有机肥的多重功能未来产业化发展的关键。在纸张制备方面，通过对传统碱法制浆技术进行改良，可有效降低烟草及其废弃物浆渣废料的产生量和纸浆卡伯值，从而提高其加工性能，有望将规模化用于纸张生产。在纤维板制备方面，不同密度纤维板的制备是烟草生物质多元化利用的一个重要方向；此外，烟草源提取纤维或功能化纤维在复合材料、纺织品等高端产品中也展现出良好的应用前景。

### 参考文献

- [1] 蒋捷媛,李玉昊,陈鹏,等. 2023 年国际烟草十大新闻 [EB/OL]. (2024-01-18) [2024-06-18]. <https://www.tobaccochina.com/html/focusnews/671834.shtml>.
- [2] 世界卫生组织. 2000 至 2030 年全球烟草使用流行趋势报告[R]. [出版地不详: 出版者不详], 2024.
- [3] 周茹. 烟草多用途利用: 前景广阔 未来可期[J]. 中国烟草, 2023(20): 71-77.
- [4] 中国烟草总公司郑州烟草研究院. 烟草多用途利用创新战略研究报告[R]. [出版地不详: 出版者不详], 2023.
- [5] BUNTIĆ A V, MILIĆ M D, STAJKOVIĆ-SRBINOVIĆ O S, et al. Cellulase production by *Sinorhizobium meliloti* strain 224 using waste tobacco as substrate[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(10): 5881-5890.
- [6] BUNTIC A V, STAJKOVIC-SRBINOVIC O, DELIC D, et al. The production of cellulase from the waste tobacco residues remaining after polyphenols and nicotine extraction and bacterial pre-treatment[J]. Journal of the Serbian Chemical Society, 2019, 84(2): 129-140.
- [7] FATICA A, DI LUCIA F, MARINO S, et al. Study on analytical characteristics of *Nicotiana tabacum* L., cv. Solaris biomass for potential uses in nutrition and biomethane production[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 16828.
- [8] BARLA F G, KUMAR S. Tobacco biomass as a source of advanced biofuels[J]. Biofuels, 2019, 10(3): 335-346.
- [9] CARDOSO C R, ATAÍDE C H. Micropyrolysis of tobacco powder at 500°C: Influence of ZnCl<sub>2</sub> and MgCl<sub>2</sub> Contents on the generation of products[J]. Chemical Engineering Communications, 2015, 202(4): 484-492.
- [10] CARDOSO C R, ATAÍDE C H. Analytical pyrolysis of tobacco residue: Effect of temperature and inorganic additives[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 99: 49-57.
- [11] SALETNIK B, FIEDUR M, KWARCIAŃY R, et al. Pyrolysis as a method for processing of waste from production of cultivated tobacco (*Nicotiana tabacum* L.)[J]. Sustainability, 2024, 16(7): 2749.
- [12] SARBISHEI S, GOSHADROU A, HATAMIPOUR M S. Mild sodium hydroxide pretreatment of tobacco product waste to enable efficient bioethanol production by separate hydrolysis and fermentation[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2021, 11(6): 2963-2973.
- [13] SOPHANODORN K, UNPAPROM Y, WHANGCHAI K, et al. Environmental management and valorization of cultivated tobacco stalks by combined pretreatment for potential bioethanol production[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022, 12(5): 1627-1637.
- [14] FARRAN I, FERNANDEZ-SAN MILLAN A, ANCIN M, et al. Increased bioethanol production from commercial tobacco cultivars overexpressing thioredoxin f grown under field conditions[J]. Molecular Breeding, 2014, 34(2): 457-469.
- [15] GONZÁLEZ-GONZÁLEZ A, CUADROS F. Optimal and cost-effective industrial biomethanation of tobacco[J]. Renewable Energy, 2014, 63: 280-285.
- [16] AYAS N, KARADENIZ S. Hydrogen from tobacco waste[C]//2017 2nd International Conference Sustainable and Renewable Energy Engineering (ICSREE). Hiroshima, Japan. IEEE, 2017: 78-82.
- [17] ZHAO G H, YU Y L, ZHOU X T, et al. Effects of drying pretreatment and particle size adjustment on the composting process of discarded flue-cured tobacco leaves[J]. Waste Management & Research, 2017, 35(5): 534-540.
- [18] HERNER Ž, KUČIĆ D, ZELIĆ B. Biodegradation of imidacloprid by composting process[J]. Chemical Papers, 2017, 71(1): 13-20.
- [19] SEREMETA D C H, DA SILVA C P, ZITTEL R, et al. Pb<sup>2+</sup> adsorption by a compost obtained from the treatment of tobacco from smuggled cigarettes and industrial sewage sludge[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(1): 797-805.

- [20] MANDIĆ N, LALEVIĆ B, RAIČEVIĆ V, et al. Impact of composting conditions on the nicotine degradation rate using nicotinophilic bacteria from tobacco waste[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 20(7): 7787-7798.
- [21] ESCUDERO L B, AGOSTINI E, DOTTO G L. Application of tobacco hairy roots for the removal of malachite green from aqueous solutions: Experimental design, kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2018, 205(1): 122-133.
- [22] AMIRIPOUR F, GHASEMI S, CHAICHI M J. Nanostructured rhodamine B/aluminosilicate extracted sugarcane bagasse modified with tobacco-derived carbon quantum dot as ratiometric fluorescence probe for determination of tetracycline[J]. *Talanta*, 2024, 276: 126158.
- [23] GONÇALVES A C Jr, ZIMMERMANN J, SCHWANTES D, et al. Recycling of tobacco wastes in the development of ultra-high surface area activated carbon[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 171: 105965.
- [24] PATHAK M, ROUT C S. Flexible all-solid-state asymmetric supercapacitor based on in situ-grown bimetallic metal sulfides/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene nanocomposite on carbon cloth *via* a facile hydrothermal method[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2023, 52(3): 1668-1680.
- [25] JOKIĆ S, GAGIĆ T, KNEZ Ž, et al. Separation of active compounds from tobacco waste using subcritical water extraction[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2019, 153: 104593.
- [26] KUNG S D, SAUNDER J A, TSO T C, et al. Tobacco as a potential food source and smoke material: Nutritional evaluation of tobacco leaf protein[J]. *Journal of Food Science*, 1980, 45(2): 320-322.
- [27] DANEHOWER D A. A rapid method for the isolation and quantification of the sucrose esters of tobacco[C][C]// Centre de Coopération pour les Recherches Scientifiques Relatives au Tabac / Cooperation Centre for Scientific Research Relative to Tobacco. [S.l.:s.n.], 1987: 32-35.
- [28] JAGENDORF A T, WILDMAN S G. The proteins of green leaves. VI. centrifugal fractionation of tobacco leaf homogenates and some properties of isolated chloroplasts[J]. *Plant Physiology*, 1954, 29(3): 270-279.
- [29] PIERPOINT W S. Mitochondrial preparations from the leaves of tobacco (*Nicotiana tabacum*). 2. Oxidative phosphorylation[J]. *Biochemical Journal*, 1960, 75(3): 504-511.
- [30] PIERPOINT W S. Mitochondrial preparations from the leaves of tobacco (*Nicotiana tabacum*). 433. Glycollic oxidase and fumarase activity [J]. *The Biochemical journal*, 1960, 75(3): 511-515.
- [31] QUIK M, HUANG L Z, PARAMESWARAN N, et al. Multiple roles for nicotine in Parkinson' s disease[J]. *Biochemical Pharmacology*, 2009, 78(7): 677-685.
- [32] WWexner Medical Center. Clinical study asks: can nicotine help treat a chronic lung disease? [EB/OL]. (2024-04-02)[2024-07-02].  
<https://wexnermedical.osu.edu/mediaroom/pressreleaselisting/nicotinepatchstudy>.
- [33] RINCÓN J, DE LUCAS A, GARCÍA M A, et al. Preliminary study on the supercritical carbon dioxide extraction of nicotine from tobacco wastes[J]. *Separation Science and Technology*, 1998, 33(3): 411-423.
- [34] TITA G J, NAVARRETE A, MARTÍN Á, et al. Model assisted supercritical fluid extraction and fractionation of added-value products from tobacco scrap[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2021, 167: 105046.
- [35] BANOŽIĆ M, GAGIĆ T, ČOLNIK M, et al. Sequence of supercritical CO<sub>2</sub> extraction and subcritical H<sub>2</sub>O extraction for the separation of tobacco waste into lipophilic and hydrophilic fractions[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, 169: 103-115.
- [36] NG L K, HUPÉ M. Effects of moisture content in cigar tobacco on nicotine extraction Similarity between Soxhlet and focused open-vessel microwave-assisted techniques[J]. *Journal of Chromatography A*, 2003, 1011(1/2): 213-219.
- [37] HOSSAIN M M, SCOTT I M, BERRUTI F, et al. Optimizing pyrolysis reactor operating conditions to

- increase nicotine recovery from tobacco leaves[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, 112: 80-87.
- [38] HOSSAIN M M, SCOTT I M, BERRUTI F, et al. A two-dimensional pyrolysis process to concentrate nicotine during tobacco leaf bio-oil production[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 124: 136-141.
- [39] DE LUCAS A, CAÑIZARES P, GARCÍA M A, et al. Recovery of nicotine from aqueous extracts of tobacco wastes by an H<sup>+</sup>-form strong-acid ion exchanger[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, 37(12): 4783-4791.
- [40] FATHI R M, FAUZANTORO A, RAHMAN S F, et al. Column chromatography isolation of nicotine from tobacco leaf extract (*Nicotiana tabacum* L.)[C]//2nd Biomedical Engineering's Recent Progress In Biomaterials, Drugs Development, And Medical Devices. *Proceedings of the International Symposium of Biomedical Engineering (ISBE) 2017*. Bali: AIP Publishing, 2018, 1933: 030011.
- [41] RUIZ-RODRIGUEZ A, BRONZE M R, DA PONTE M N. Supercritical fluid extraction of tobacco leaves: A preliminary study on the extraction of solanesol[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2008, 45(2): 171-176.
- [42] SAFITRA E R, MUHARAM Y, FARIZAL, et al. Solanesol sequential extraction from tobacco leaves using microwave-ultrasound-assisted extraction (MUAE): MAE optimization[J]. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2024, 8: 100393.
- [43] MACHADO P A, FU H, KRATOCHVIL R J, et al. Recovery of solanesol from tobacco as a value-added byproduct for alternative applications[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(3): 1091-1096. [\[LinkOut\]](#)
- [44] SHIFFLETT J R, WATSON L, MCNALLY D J, et al. Analysis of the polyphenols of tobacco using pressurized liquid extraction (PLE) and ultra performance liquid chromatography with electrospray ionization - tandem mass spectrometric detection (UPLC-ESI-MS/MS)[J]. *Beiträge Zur Tabakforschung International*, 2017, 27(8): 195-207.
- [45] KARABEGOVIĆ I T, VELJKOVIĆ V B, LAZIĆ M L. Ultrasound-assisted extraction of total phenols and flavonoids from dry tobacco (*Nicotiana tabacum*) leaves[J]. *Natural Product Communications*, 2011, 6(12): 1855-1856.
- [46] DOCHEVA M, DAGNON S, STATKOVA S, et al. Isolation of bioflavonoids from tobacco [J]. *Trakia Journal of Science*, 2012, 10: 79-83.
- [47] BANOŽIĆ M, BANJARI I, JAKOVLJEVIĆ M, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of some bioactive compounds from tobacco waste[J]. *Molecules*, 2019, 24(8): 1611.
- [48] DOCHEVA M, DAGNON S, STATKOVA-ABEGHE S. Flavonoid content and radical scavenging potential of extracts prepared from tobacco cultivars and waste [J]. *Natural Product Research*, 2014, 28(17): 1328-1334.
- [49] TSIBRANSKA I, KARABOJKOVA V, JELIAZKOV J R. Concentration of flavonoids in ethanolic extracts from tobacco leaves through nanofiltration[J]. *Bulgarian Chemical Communications*, 2016, 48(2): 232-237.
- [50] TSO T, LOWE R H, DEJONG D W. Homogenized Leaf Curing: I. Theoretical Basis and Some Preliminary Results[J]. *Beiträge zur Tabakforschung / Contributions to Tobacco Research*, 1975, 8: 44-51..
- [51] FU H, MACHADO P A, HAHM T S, et al. Recovery of nicotine-free proteins from tobacco leaves using phosphate buffer system under controlled conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(6): 2034-2042.
- [52] FÍLA J, HONYS D. Phosphoprotein enrichment from tobacco mature pollen crude protein extract[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2017, 1669: 265-274.
- [53] SEVERSON R F, ARRENDALE R F, CHORTYK O T, et al. Isolation and characterization of the sucrose esters of the cuticular waxes of green tobacco leaf[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1985, 33(5): 870-875. [\[LinkOut\]](#)
- [54] ASHRAF-KHORASSANI M, TAYLOR L T, NAZEM N, et al. Isolation of *Tetra*-acyl sucrose esters from Turkish tobacco using supercritical fluid CO<sub>2</sub> and comparison with conventional solvent extraction[J]. *Journal*

of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(6): 1866-1872.

- [55] POPOVA V, GOCHEV V, GIROVA T, et al. Extraction products from tobacco-aroma and bioactive compounds and activities [J]. *Current Bioactive Compounds*, 2015, 11(1): 31-37.
- [56] MISSAOUI B, KRAFFT J M, HAMDI N, et al. Valorizing industrial tobacco wastes within natural clays and chitosan nanocomposites for an ecofriendly insecticide[J]. *Waste Management*, 2023, 168: 146-155.
- [57] MURATA M, NAKAI Y, KAWAZU K, et al. Loliolide, a carotenoid metabolite, is a potential endogenous inducer of herbivore resistance[J]. *Plant Physiology*, 2019, 179(4): 1822-1833.
- [58] BAXTER A A, POON I K H, HULETT M D. The plant defensin NaD1 induces tumor cell death via a non-apoptotic, membranolytic process [J]. *Cell Death Discovery*, 2017, 3(1): 16102.
- [59] FATICA A, FANTUZ F, DI LUCIA F, et al. Ensiled biomass of Solaris tobacco variety used as forage: Chemical characteristics and effects on growth, welfare, and follow-up of Holstein heifers[J]. *Animal*, 2021, 15(7): 100235.
- [60] CHANDLER J P, GERRARD M W, VIGNEAUD V D. The utilization for animal growth of tobacco mosaic virus as a sole source of protein in the diet[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1947, 171(2): 823-828.
- [61] KAJITA S, ISHIFUJI M, OUGIYA H, et al. Improvement in pulping and bleaching properties of xylem from transgenic tobacco plants [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2002, 82(10): 1216-1223.
- [62] AKGÜL M, ÇAMLIBEL O. Manufacture of medium density fiberboard (MDF) panels from *Rhododendron* (*R. ponticum* L.) biomass[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(4): 438-443.
- [63] OVALI S. Characterization of waste *Nicotiana rustica* L. (tobacco) fiber having a potential in textile and composite applications[J]. *Polymers*, 2024, 16(8): 1117.
- [64] MUVHIIWA R, MAWERE E, MOYO L B, et al. Utilization of cellulose in tobacco (*Nicotiana tabacum*) stalks for nitrocellulose production[J]. *Heliyon*, 2021, 7(7): e07598.
- [65] KAJITA S, KATAYAMA Y, OMORI S. Alterations in the biosynthesis of lignin in transgenic plants with chimeric genes for 4-coumarate: Coenzyme A ligase[J]. *Plant & Cell Physiology*, 1996, 37(7): 957-965.
- [66] KAJITA S, MASHINO Y, NISHIKUBO N, et al. Immunological characterization of transgenic tobacco plants with a chimeric gene for 4-coumarate:CoA ligase that have altered lignin in their xylem tissue [J]. *Plant Science*, 1997, 128(1): 109-118.
- [67] KAJITA S, HISHIYAMA S, TOMIMURA Y, et al. Structural characterization of modified lignin in transgenic tobacco plants in which the activity of 4-coumarate: Coenzyme A ligase is depressed[J]. *Plant Physiology*, 1997, 114(3): 871-879.
- [68] SHAKHES J, MARANDI M A B, ZEINALY F, et al. Tobacco residuals as promising lignocellulosic materials for pulp and paper industry[J]. *BioResources*, 2011, 6(4): 4481-4493.
- [69] 刘立全, CASTRO R C, AGRUPIS S C, et al.. 利用烟杆制造纤维板的研究[J]. *烟草科技*, 2000, 33(7): 32-34.
- [70] JIMENEZ J P, ACDA M N, RAZAL R A, et al. Influence of mixing waste tobacco stalks and paper mulberry wood chips on the physico-mechanical properties, formaldehyde emission, and termite resistance of particleboard[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 187: 115483.
- [71] AKPINAR O, ERDOGAN K, BOSTANCI S. Enzymatic production of Xylooligosaccharide from selected agricultural wastes[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2009, 87(2): 145-151.
- [72] AKPINAR O, ERDOGAN K, BAKIR U, et al. Comparison of acid and enzymatic hydrolysis of tobacco stalk xylan for preparation of xylooligosaccharides [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2010, 43(1): 119-125.
- [73] SANTANA M B, GAMA F Á, PEREIRA I O, et al. Harnessing tobacco stem biomass for eco-friendly xylo-oligomers production *via* hydrothermal treatment and succinic acid *via* fermentation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 456: 142305.

- [74] SANTANA M B, SOARES L B, ZANELLA E, et al. Hydrothermal pretreatment for the production of prebiotic oligosaccharides from tobacco stem[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 382: 129169.
- [75] FENG Q W, WANG B, ZIMMERMAN A R. Application of C and N isotopes to the study of biochar biogeochemical behavior in soil: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 256: 104860.
- [76] SHARMA R K, WOOTEN J B, BALIGA V L, et al. Characterization of char from the pyrolysis of tobacco[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(4): 771-783.
- [77] STREZOV V, POPOVIC E, FILKOSKI R V, et al. Assessment of the thermal processing behavior of tobacco waste [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(9): 5930-5935.
- [78] ONOREVOLI B, DA SILVA MACIEL G P, MACHADO M E, et al. Characterization of feedstock and biochar from energetic tobacco seed waste pyrolysis and potential application of biochar as an adsorbent[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(1): 1279-1287.
- [79] BOOKER C J, BEDMUTHA R, SCOTT I M, et al. Bioenergy II: characterization of the pesticide properties of tobacco bio-oil[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2010, 8(1): A26.
- [80] BOOKER C J, BEDMUTHA R, VOGEL T, et al. Experimental investigations into the insecticidal, fungicidal, and bactericidal properties of pyrolysis bio-oil from tobacco leaves using a fluidized bed pilot plant[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(20): 10074-10079.