



曾畅,刘璐璐,王泽伟,等. 微生物降解烟碱的研究进展[J]. 轻工学报,2026,41(1):101-110.
ZENG C, LIU L L, WANG Z W, et al. Research progress on microbial degradation of nicotine[J]. Journal of Light Industry, 2026, 41(1): 101-110. DOI:10.12187/2026.01.010

微生物降解烟碱的研究进展

曾畅¹, 刘璐璐², 王泽伟¹, 朱纯¹, 徐亚东¹, 苏二正², 吴蓉²

1. 江苏中烟工业有限责任公司 南京卷烟厂, 江苏 南京 210019;
2. 南京林业大学 轻工与食品学院, 江苏 南京 210037

摘要: 烟碱是烟草及其加工废弃物中的主要生物碱, 环境持久性强、生物毒性高, 其排放对生态环境及人体健康构成潜在危害, 烟碱降解已成为烟草产业绿色发展与废弃物治理中的关键环节。相较于农业调控及物理、化学法在能耗、成本、香气质量等方面的局限性, 微生物降解因其高效性、专一性和环境友好而备受关注。系统梳理了烟碱的理化性质、处理方法及微生物降解烟碱的主要微生物类群、降解特性、代谢途径等相关文献, 节杆菌属、假单胞菌属等是目前研究较多的烟碱降解微生物, 主要通过吡啶途径、吡咯途径及 VPP 途径将烟碱转化为可进入三羧酸循环的小分子代谢物, 关键降解酶在通路中发挥核心作用。此外, 概述了微生物降解烟碱在烟草废弃物生物修复、烟草加工制造业及生物制药等领域的应用前景。未来研究将围绕菌株环境适应性弱、降解效率不稳定等问题, 从定制菌株开发、合成菌群构建、多组学解析、代谢过程优化等方面开展研究, 以推动微生物降解烟碱技术的产业化应用。

关键词: 微生物降解; 烟碱; 烟草加工; 废弃物治理

中图分类号: TS572; S572 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2026)01-0101-10

0 引言

烟草行业是全球范围内的重要产业之一, 涵盖烟草种植、加工及卷烟生产、销售等多个环节。中国是世界上最大的烟叶生产国和卷烟消费国, 其烟草种植面积长期保持在 $1.00 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 以上, 2024 年全国烟叶产量达 $2.30 \times 10^6 \text{ t}$, 卷烟消费量占全球总消费量的 40% 以上^[1]。在烟草种植、加工过程中, 会不可避免地产生含有高浓度烟碱的固体和液体烟草废弃物^[2]。这些废弃物占烟草总质量的 25%

以上, 其中烟碱平均质量分数为 1.80%^[3]。当烟碱质量分数超过 0.05% 时, 欧盟将其列为有毒和危险物质, 美国环保署 (EPA) 也将其列入有毒物质释放清单 (TRI)。国家烟草专卖局早在 2006 年就提出, 对不能回收利用的废弃烟叶和烟秆必须予以销毁。然而, 由于规范化处理设施覆盖不足及经济成本制约, 当前约 73% 的产区仍采用直接填埋或露天集中焚烧等粗放方式执行销毁要求, 这导致二噁英、PM_{2.5} 等环境污染物释放及资源浪费^[4]。当未经适当储存和处理的烟草废弃物被倾倒在地表时, 烟草中

收稿日期: 2025-04-11; 修回日期: 2025-07-23; 出版日期: 2026-02-15

基金项目: 江苏中烟工业有限责任公司对外科技合作项目 (GZSX20240660); 中央林业科技推广示范资金项目 (Su[2023]TG03)

作者简介: 曾畅 (1989—), 女, 湖南省长沙市人, 江苏中烟工业有限责任公司南京卷烟厂高级工程师, 主要研究方向为烟草品质控制。E-mail: 1214203978@qq.com

通信作者: 苏二正 (1976—), 男, 安徽省巢湖市人, 南京林业大学教授, 主要研究方向为林源药食资源高值化加工。E-mail: ezhsu@njfu.edu.cn

易溶于水的烟碱成分会污染地下水及土壤,扰乱生态平衡^[5]。另外,人体若长期暴露于高浓度烟碱环境中,可能使神经系统、心血管系统受损,甚至有罹患癌症的风险^[6]。因此,如何运用绿色生物技术提高烟碱降解效率,减少烟碱污染,是当前环境保护与公共健康研究的重点。

1 烟碱的理化性质及处理方法

1.1 烟碱的理化性质

烟碱,俗称尼古丁,是一种具有高毒性的杂环化合物,其化学结构由一个吡啶环和一个氢化吡咯环组成^[7]。作为烟草中最具代表性的特异性成分,烟碱在烟草植株中广泛分布,尤其在烟叶中的含量最高,占烟草总生物碱的95%以上,平均含量约4%。烟碱的整体性质呈弱碱性,是一种无色透明或淡黄色的油状液体,具有强烈的刺激性气味和苦味^[8]。烟碱具有较强的挥发性和潮解性,易在空气中挥发并吸收水分。当环境温度低于60℃时,烟碱能与水以任意比例互溶,且不会因水分挥发而分解^[9]。此外,烟碱还可溶于乙醇、氯仿、乙醚等有机溶剂,并易渗入皮肤^[10]。烟碱在阳光下易发生氧化反应变为棕黄色,并散发出特殊的烟臭味。自由基态的烟碱燃点较低,在35℃、较低气压下即可燃烧。烟碱的沸点较高,为247℃,比重为1.009^[11]。烟碱的化学结构和理化性质决定了其在环境中的稳定性和潜在毒性。烟碱不仅对烟草的生长和代谢具有重要作用,还对环境和人类健康构成潜在威胁。因此,研究烟碱的降解行为及其处理方式具有重要意义。

1.2 烟碱的降解行为和代谢稳定性

烟碱的降解行为和代谢稳定性是影响其生态风险的关键因素。烟碱在自然环境中的降解主要依赖于物理、化学和生物过程,且受温度、湿度、pH值、光照、微生物活性等多种因素影响。烟碱具有较强的挥发性,尤其在高温环境中易从烟草废弃物或污染土壤中挥发到大气中,随后通过沉降作用重新进入土壤或水体^[12]。此外,烟碱在土壤中易被有机质和黏土矿物吸附,但其吸附能力受土壤pH值和有机质含量的影响。在酸性条件下,烟碱的吸附

能力较强,而在碱性条件下则易解吸^[13]。光照也是影响烟碱降解的重要因素之一,烟碱在阳光下易发生光解反应,生成可替宁、烟碱氧化物等多种中间产物^[14]。同时,烟碱还可与大气中的氧化剂发生反应,进一步降解为小分子化合物。

烟碱在环境中的代谢稳定性较高,降解速率较慢。研究^[15]表明,烟碱在土壤中的半衰期可达数周至数月,具体取决于环境条件和微生物群落的组成。微生物降解是烟碱在环境中最主要的降解途径之一,在富含降解菌的土壤或水体中,烟碱的降解速率显著加快。此外,温度、湿度、pH值、氧气浓度等也会显著影响烟碱的降解速率。例如,在高温和高湿条件下,烟碱的降解速率通常较快。然而,烟碱的化学结构使其具有较强的化学稳定性,尤其是在缺乏特异性降解酶的条件下,其降解难度较大^[16]。

1.3 烟碱的处理方法

随着人们健康意识的显著提升及对优美生态环境的日益向往,如何有效降低环境中烟碱的含量已成为业界亟待解决的关键研究议题之一。目前,主要利用农业技术、物理、化学、微生物等多种手段来降解烟碱,但大规模投入使用仍存在局限性。

农业技术方法主要通过遗传调控、栽培管理等措施降低烟草中烟碱含量。烟碱的合成从根本上受遗传因素控制,因此通过常规育种和遗传工程手段可以有效调控烟碱的合成。例如,杨全柳等^[17]利用航空诱变育种方法对烤烟新品系YZ15的农艺性状和经济性状进行改良,成功降低了烟碱和总氮含量,并通过转录组获得了调节烟碱含量的关键基因,为低烟碱烤烟育种提供了合理的基因资源。通过对烟草中烟碱合成相关基因的改造,可以显著降低烟碱的产生。例如,调控腐胺甲基转移酶基因、甲基腐胺氧化酶基因、喹啉酸磷酸核糖基转移酶基因等关键基因,能够有效抑制烟碱的合成^[18]。然而,部分基因的调控可能会影响烟草的正常生长,因此在实际应用中需谨慎选择,以避免基因调控影响烟草正常生长。小檗碱桥状酶基因和烟碱根叶转运基因的调控既能降低烟碱含量,又不影响烟草的正常生长,具有较高的应用潜力^[19]。此外,优化

农业栽培管理技术也是降低烟碱含量的重要手段。均衡施肥、合理密植、适时打顶抹杈、喷施生长调节剂(如吲哚乙酸、赤霉素等)等措施均能有效抑制烟碱的合成。例如,通过控制氮元素的施用量并增加磷、钾元素的施用量,可以在减少烟碱合成的同时保证烟叶的正常生长^[20]。

物理方法主要包括蒸馏法、浸取法、溶剂萃取法等,其中蒸馏法和浸取法虽能够有效去除烟碱,但存在处理难度大、能耗高、操作复杂等问题^[20]。此外,溶剂萃取法也被广泛应用于烟碱的去除。许志文等^[22]采用 pH 值为 8 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液浸泡烟草废弃物,将烟碱含量降低了 58.43%。然而,这些物理方法可能造成卷烟香气损失,限制了其大规模应用。

化学方法基于氧化还原反应,主要包括芬顿氧化、臭氧催化氧化、电化学氧化、光催化氧化等方法。其中,光催化氧化法因环保、经济等特点成为近年来的研究热点。李振杰等^[23]利用制备的 Gly-STiO_2 和 HF-STiO_2 光催化剂降解烟碱,在光照 6 h 后,烟碱水溶液的降解率分别达 66.3% 和 62.8%。此外,C. X. Qi 等^[24]通过制备氨基修饰的 $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{CaCO}_3$ 复合材料,为烟碱及相关有机污染物的降解提供了新的途径。然而,这些化学方法在实际应用中仍面临成本高、副产物多等问题,限制了其大规模推广。

微生物降解技术因高效、环保等特点成为烟碱降解研究的热点方向。与农业技术和物理、化学方法相比,微生物降解技术具有专一性强、对其他成分影响小等优势,既可以在大田生长期应用,也可用于烟草废弃物的无害化处理。微生物降解烟碱的核心在于利用特定菌株的代谢能力,将烟碱转化为无毒或低毒的小分子化合物。假单胞菌属(*Pseudomonas*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)等菌株已被证实具有高效的烟碱降解能力^[25]。在烟草废弃物堆肥处理中,通过添加高效烟碱降解菌剂,可以显著加速烟碱的降解过程,同时提高堆肥的肥效。此外,通过优化发酵条件,可以进一步提高微生物降解烟碱的效率。然而,降解菌株的环境适应性、降解效率的稳定性、大规模培养的成本等问题仍需进

一步解决。另外,烟碱降解过程中产生的中间产物可能对微生物活性产生抑制作用,进而影响降解效率。因此,未来的研究应重点关注降解菌株的适应性改造、代谢网络的优化及降解过程的实时监控,以推动微生物降解技术的实际应用。

综上所述,传统的农业技术和物理、化学方法在烟碱降解方面已取得了一定成效,但仍存在成本高、操作复杂、副产物多等局限性。相比之下,微生物降解技术因高效、环保等特点展现出巨大的应用潜力,有望成为未来烟碱降解的主流方法。

2 降解烟碱的主要微生物类群

烟碱降解微生物的研究始于 20 世纪 40 年代,且随着科学技术的进步,越来越多的烟碱降解菌株被分离和鉴定出来。这些菌株主要分布于细菌和真菌中,其中细菌的研究较为深入,尤其是假单胞菌属和节杆菌属在烟碱降解中发挥了重要作用。

2.1 主要烟碱降解菌属及其生态分布

降解烟碱的微生物广泛分布于烟草植株、植烟土壤、卷烟厂废弃物及受烟草污染的水体和土壤中,这些环境中的微生物在长期接触烟碱后,逐渐进化出降解烟碱的能力。其中,烟草植株及植烟土壤是筛选烟碱降解菌株的主要来源。苏丹等^[26]以烟碱为唯一碳源和氮源,从福建三明烟区的烟草植株中筛选到 1 株具有高效降解烟碱特性的内生假单胞菌属 Y5,该菌株在烟碱质量浓度为 0.5 g/L 的无机盐培养基中,15 h 内基本能完全降解烟碱。此外,H. H. Wang 等^[27]从烟草田间土壤中分离出 1 株假单胞菌 CS3,该菌能在 24 h 内完全降解 1 g/L 的液体烟碱,并能在 72 h 内几乎完全降解烟碱质量浓度为 1.0~2.5 g/L 的土样。X. W. Gong 等^[28]以烟碱为唯一碳源和氮源,从烟草种植园土壤中分离出 1 株红球菌 Y22,该菌能够在 9 h 内完全降解 1.0 g/L 的烟碱。卷烟厂生产过程中产生的废水和烟渣富含烟碱,可为微生物提供丰富的碳源和氮源。韩娜娜等^[29]从烟草厂污染的土壤中筛选到中间苍白杆菌 E3,该菌株的最适培养条件为葡萄糖质量浓度为 15 g/L,蛋白胨质量浓度 12 g/L,培养时间 22 h,培养温度 33 ℃,在此条件下的烟碱降解率

为 79.32%。近年来,研究人员从烟草甲虫、鸟类肠道等非传统环境中也筛选到烟碱降解菌。共生肠道类细菌木聚糖菌可以降低小鼠肠道中烟碱的浓度,并将烟碱转化为代谢物 4-羟基-1-(3-吡啶基)-1-丁酮 (HPB),因此是一种有效的人体烟碱降解菌^[30]。木聚糖菌的耐酸特性(pH 值 5.0~7.0)与烟草废弃物堆肥环境(pH 值 6.5~8.0)高度兼容,说明其具有技术迁移潜力,但需进一步研究其在固态发酵体系中对烟碱的降解效率。因此,通过研究烟碱降解菌属及其生态分布,有望发现更新型高效的烟碱降解菌株,为烟草废弃物的生物处理提供新的思路 and 手段。

2.2 典型菌株的降解能力和特点

在已发现的烟碱降解微生物中,节杆菌属和假单胞菌属的研究最为深入,其降解能力和特点较为清晰。节杆菌属是一类专性需氧的革兰氏阳性菌,其细胞分裂过程中会形成独特的关节状结构。自 20 世纪 50 年代发现嗜烟碱节杆菌以来,节杆菌属在烟碱降解研究中占据了重要地位^[31],越来越多的该属菌株被分离和鉴定出来,且都具有较高的烟碱降解活性。夏振远等^[32]从烟草种植土壤中分离并鉴定出烟草节杆菌 K9,该菌能够在初始烟碱质量浓度为 1 g/L 的培养基上生长,且 24 h 内的烟碱降解率达 85%。A. D. Ruan 等^[25]研究发现,节杆菌属 aRF-1 可以在 25~40 ℃ 温度范围内生长和转化烟碱。假单胞菌属是一类代谢多样性极高的革兰氏阴性菌,广泛分布于土壤和水体中。该属菌株均表现出较高的代谢多样性,可在不同生长环境中增殖形成菌落。近年来,假单胞菌 HF-1^[33]、恶臭假单胞菌 S16^[34]、施氏假单胞菌 ZCJ^[35] 等具有烟碱降解能力的假单胞菌被分离并鉴定出来,且数量呈上升趋势。绝大部分假单胞菌属菌株都可在含有烟碱的培养基上生长,且具有较高的烟碱耐受性。例如,香鱼假单胞菌 TND35 可在 44 h 内降解初始质量浓度为 4.92 g/L 的烟碱,且烟碱的降解活性与其生长具有同步性^[36]。

除了节杆菌属和假单胞菌属,红球菌属、剑菌属、不动杆菌属等也被证实具有烟碱降解能力。此外,目前已分离并鉴定出具有烟碱降解能力的真菌

包括乳白原毛平革菌 YK-624^[37]、刺孢小克银汉霉 IFO-4444^[38]、米曲霉 112822^[39] 等。尽管这些真菌菌株的烟碱降解能力相对较低,但通过基因工程和代谢工程手段对其进行改造,有望提高其降解效率。

2.3 不同微生物降解烟碱的适应性和协同作用

烟碱降解微生物的适应性和协同作用在实际应用中具有重要意义。不同菌株对温度、pH 值、氧气浓度等环境条件的适应性差异较大,这直接影响其降解效率。大多数烟碱降解菌的最适生长温度为 30 ℃,最适 pH 值为 6.0~7.4。例如,假单胞菌属菌株通常在 30 ℃ 和 pH 值 6.4~7.4 条件下表现出较高的降解活性,而节杆菌属菌株的最适条件为 30 ℃ 和 pH 值 7.0。此外,部分菌株对高质量浓度烟碱表现出较强的耐受性。例如,香鱼假单胞菌 TND35 可耐受高达 4.92 g/L 的烟碱^[36]。而这通常是由高效的烟碱转运系统、活跃的解毒代谢途径及强大的抗氧化应激能力共同作用的结果。然而,单一菌株往往难以同时具备高效降解、广谱适应性和强抗逆性,因此利用微生物间的协同作用成为提升降解效率和环境适应性的重要策略。在烟草废弃物堆肥过程中,假单胞菌属和节杆菌属通过初级降解菌与次级代谢菌的协同作用或代谢互补作用显著提升烟碱降解效率^[40]。通过人工构建特定功能的混合菌群或共培养体系,理论上可以整合不同菌株的优势,克服单一菌株在底物利用范围、环境耐受性或降解效率上的局限性。然而,这种策略也面临诸多挑战,如复杂的微生物互作可能导致菌群结构不稳定,优势菌株的过度生长可能抑制关键功能菌,环境条件的波动易引发菌群失衡,以及代谢副产物的积累可能产生抑制效应。合成生物学和基因工程技术为解决上述问题、定向改造菌株提供了强大工具。研究人员尝试通过理性设计,改造烟碱降解菌的代谢通路、优化调控网络或赋予其新的抗逆特性,以期获得适应性更强、效率更高且更易控制的降解菌^[41]。因此,针对菌株适应性问题,当前的解决思路包括:1) 对高效降解菌进行定向环境胁迫驯化,筛选获得适应性更强的突变株;2) 开发基于天然矿物或高分子材料的微生物固定化技术,提

高菌体对环境冲击的缓冲能力;3)探索利用群体感应或代谢工程手段,调控菌群在胁迫条件下的应激响应和协同行为。

3 烟碱的微生物代谢途径

烟碱的微生物代谢途径复杂多样,不同微生物通过不同的代谢途径将烟碱分解为氨基酸、羧酸等小分子物质,为自身细胞的物质合成和能量循环提供碳源和氮源。这些代谢途径通常需要多种生物酶和辅因子的参与,且降解产物各异。目前,在烟碱降解细菌领域,研究较为深入且机理明确的代谢途径主要有节杆菌属中的吡啶途径^[42]、假单胞菌属中的吡咯途径^[25]及根瘤菌群细菌 S33 中发现的根瘤农杆菌吡啶和吡咯烷途径的新杂交途径(VPP 途径)^[43]。相比之下,真菌的烟碱降解途径研究较少,主要集中在细胞色素 P450 介导的去甲基化途径,但其基因组复杂性及培养难度导致通路解析不完整^[44]。

3.1 吡啶途径

在节杆菌属中,烟碱的降解途径主要是吡啶途径^[45]。烟碱进入细菌细胞后,首先经羟基化和氧化反应生成 6-羟基-N-甲基麦斯明(6-HMM),随后 6-HMM 在水溶液中自发开环生成 6-羟基假氧化烟碱(6-HPON)。6-HPON 在吡啶环的 2 位发生羟基化,生成 2,6-二羟基假氧化烟碱,其侧链断裂后生成 2,6-二羟基吡啶(2,6-DHP)和 γ -N-甲基氨基丁酸盐(MGABA)。2,6-DHP 在 3 位再次羟基化,生成 2,3,6-三羟基吡啶,该物质不稳定,可自发生成烟碱蓝。同时,MGABA 经 γ -N-甲基氨基丁酸盐氧化酶、单胺氧化酶和琥珀酸半醛脱氢酶催化生成三羧酸(TCA)循环的中间产物琥珀酸盐,为细胞提供能量和碳源。

3.2 吡咯途径

在假单胞菌属中,烟碱的降解途径主要是吡咯途径^[46]。以恶臭假单胞菌 S16 为例,烟碱首先通过烟碱氧化还原酶催化生成 N-甲基麦斯明(NMM),随后 NMM 经假烟碱胺氧化酶催化生成假烟碱(PN)。PN 经 3-琥珀酰半醛吡啶脱氢酶和 3-琥珀酰吡啶单加氧酶催化生成 3-琥珀酰半醛吡啶

(SAP)、3-琥珀酰吡啶(SP)和 6-羟基-3-琥珀酰吡啶(HSP)。HSP 经 6-羟基-3-琥珀酰吡啶羟化酶催化生成 2,5-二羟基吡啶(2,5-DHP)和琥珀酸半醛。2,5-DHP 首先经 2,5-二羟基吡啶双加氧酶催化的氧化反应发生开环,随后经 N-甲酰马来酸脱甲酰基酶、马来酸酰胺水解酶和马来酸顺式/反式异构酶催化生成富马酸,最终进入 TCA 循环。琥珀酸半醛在琥珀酸半醛脱氢酶的催化下,被氧化生成琥珀酸,随后进入 TCA 循环。

3.3 VPP 途径

VPP 途径是吡啶途径和吡咯途径的杂交途径,主要存在于中间色杆菌 DN2、甜瓜鞘氨醇单胞菌 TY、申氏菌 HZN7、根瘤农杆菌 S33 等^[47]。以根瘤农杆菌 S33 为例,烟碱首先通过吡啶途径降解为 6-HPON,再进一步通过吡咯途径降解为 HSP。而 HSP 通过吡咯途径的后续反应,生成琥珀酸和富马酸,最终进入 TCA 循环。中间代谢物 6-羟基-3-琥珀酰半醛吡啶(6-HSAP)连接了吡啶途径和吡咯途径。

目前,真菌的烟碱降解途径研究较少,主要集中在去甲基化途径。该途径从烟碱吡咯环的去甲基化开始,生成的去甲烟碱进一步被降解为其他小分子物质。尽管真菌的烟碱降解途径尚未完全阐明,但其独特的代谢机制为烟碱降解研究提供了新的视角。

4 微生物降解烟碱的应用

微生物降解烟碱技术在烟草废弃物生物修复、烟草加工制造业及生物制药行业中展现了广阔的应用前景。利用高效降解烟碱的微生物,不仅可以有效处理烟草废弃物,还能改善烟草制品的品质,并为药物合成提供重要前体物质。

4.1 烟草废弃物的生物修复

烟草种植、加工过程中产生的废弃物含有大量烟碱,若未得到有效处理,会对环境造成严重污染。微生物降解技术为烟草废弃物的无害化处理提供了高效、环保的解决方案。其中堆肥技术能够让微生物利用烟碱作为碳源生长和繁殖,同时将烟碱降解为无害或低毒的物质。该技术的降解效率高、操

作简便、成本低廉,且产生的热量还可杀死病原菌、寄生虫卵等,提高废弃物的卫生质量。然而,微生物降解技术在烟草废弃物修复中的大规模应用常受到烟碱降解菌株环境适应性的制约。在堆肥等实际处理系统中,温度、pH 值、湿度、氧气含量及抑制物浓度往往呈现剧烈的时空动态变化,单一菌株或简单混合菌群可能难以在整个处理周期及堆体不同区域都维持高活性,这导致降解效率不稳定或局部失效。针对烟碱降解菌株适应性问题,研究者提出了多项解决策略。S. Rana 等^[48]研究发现,嗜气芽孢杆菌 IMBL 能在 56 d 内降解土壤中 70% 的新烟碱类污染物。D. Hegde 等^[49]研究发现,由不动杆菌属、肠杆菌属和芽孢杆菌属组成的复合菌群在 15 d 内的降解率超过 82%,较对照组提升了 28%~41%。针对烟草废弃物的生物修复技术,可从以下几个方面开展研究。首先,模拟实际堆肥环境的动态变化,对高效降解菌进行定向驯化与选育,筛选获得耐受范围更广、恢复能力更强的优势菌株。F. Briski 等^[50]采用好氧堆肥的方法,利用微生物降解菌,可在 16 d 内高效降解烟草固体废物中 80% 的烟碱。王瑞等^[51]将烟碱降解菌 EA-17 菌添加到以烟草秸秆为原料的堆肥中进行腐熟发酵,发现该菌在堆肥中生长良好,烟碱降解率较对照组提高了 74.50%,纤维素、半纤维素降解率较对照组分别提高了 17.52% 和 26.29%。其次,通过微生物固定化技术将筛选获得的高效降解菌固定于天然载体或人工高分子材料中,以显著增强菌体抵抗环境冲击的能力,并利于菌群回收利用^[52]。另外,微生物生态制剂的应用也是生物修复的重要形式。郑小嘎等^[53]研究发现,用烟叶表面真菌制备的微生物生态制剂处理上部烟叶,可使烟碱质量浓度降低 14%~20%。烟碱降解微生物不仅能够降解烟碱,还可以降解环境中具有相似结构的化合物。研究^[52]表明,不动杆菌属和鞘氨醇单胞菌属能够降解新烟碱类杀虫剂,这为环境污染治理提供了新的生物修复手段。

4.2 烟草加工制造业中的应用

烟碱含量是影响卷烟产品感官品质的关键因素之一^[54]。烟碱含量过高会导致烟草制品刺激性增强,烟气劲头过大,吸味变差;而烟碱含量过低则

会使烟草制品口感平淡,烟气少香无味,不能满足消费者的生理需求^[55]。微生物降解技术通过选择性降解烟碱及其不良前体物质,能够有效改善烟草品质。研究^[45]表明,添加适当微生物培养物既可有效降低烟碱含量,还能通过降解刺激性生物碱类或特定氨基酸衍生物,减少杂气。同时,某些微生物的代谢产物或其催化反应可能促进烟草中糖苷类香气前体物质的水解或美拉德反应,从而改善烟草的香气和口感。Y. Yang 等^[56]发现,假单胞菌属的丰度在烟叶发酵过程中逐渐增加,其代谢物鞘氨醇通过鞘脂代谢途径提高了烟叶品质。L. Y. Zhang 等^[7]研究发现,芽孢杆菌、假单胞菌、克雷伯氏菌等高活性菌株能够通过降解烟碱和改善烟草成分,显著提升烟草制品品质。然而,微生物降解技术的成功应用高度依赖于所选微生物/酶的特异性、降解过程的精确控制及严格的无害化处理。

4.3 生物制药行业中的应用

烟碱降解过程中产生的中间代谢物可以作为药物合成的前体物质或直接用于治疗相关疾病,在生物制药行业中具有重要的应用价值。例如,HSP 是烟碱降解过程中的重要中间代谢物,可用于制备镇痛药物前体。利用恶臭假单胞菌 S16 降解烟碱生成 HSP,能够简化药物合成过程并提高效率^[46]。6-羟基-L-烟碱(6-HLN)是节杆菌属降解烟碱过程中产生的重要代谢物,能够对学习记忆产生积极影响^[57]。可替宁、6-HLN 等烟碱代谢物在阿尔茨海默病斑马鱼模型中表现出显著的神经保护作用,能够通过改善抗氧化系统和降低氧化应激减缓疾病发展^[58]。恶臭假单胞菌 S2 中的 NicA16 酶能够将烟碱转化为非成瘾物质 4-氨基-1-(3-吡啶基)-丁基酮,为治疗烟碱成瘾提供了新思路^[59]。因此,微生物降解烟碱技术在生物制药行业中的应用不仅为药物合成提供了重要前体物质,还为神经疾病和烟碱成瘾治疗开辟了新的途径。

5 结语

烟碱是烟草中的主要生物碱,其持久性和毒性会对环境和健康构成威胁。微生物降解烟碱技术因其高效、环保等特点,成为烟碱污染治理的重

要方法。本文综述了烟碱的理化性质、处理方法、降解微生物种类、降解途径及其应用进展。烟碱的理化性质决定了其环境降解行为和代谢稳定性。农业技术、化学等传统降解方法存在成本高、二次污染等问题,而微生物降解技术通过特定菌株的酶催化作用,能够高效、选择性地降解烟碱。节杆菌属和假单胞菌属菌株通过吡啶途径、吡咯途径和VPP途径将烟碱分解为无毒或低毒的小分子物质,烟碱脱氢酶、6-羟基烟碱氧化酶等关键酶在降解过程中起重要作用。在实际应用中,微生物降解技术在烟草废弃物生物修复、烟草加工制造业和生物制药领域展现了广阔应用前景。堆肥和液态发酵可显著降低烟碱含量;在烟草加工中,微生物降解能改善烟草香气和口感;在生物制药领域,烟碱降解中间代谢物为药物合成提供前体物质,并在神经疾病和烟碱成瘾治疗中具有潜在应用价值。

尽管微生物降解技术取得了显著进展,但仍面临降解菌株环境适应性不强、降解效率稳定性不够及大规模应用成本较高的问题。未来研究应重点关注降解菌株的适应性改造、代谢网络的优化及降解过程的实时监控,以推动微生物降解技术的实际应用。首先,研究者将运用CRISPR-Cas9基因编辑技术提升催化效率,推动定制菌株开发,优化多酶代谢网络,并可结合人工智能驱动的实时监控系統,实现从烟碱到高值化合物的精准转化,突破菌株环境适应性瓶颈。其次,构建人工合成菌群或利用原位微生物组调控策略,利用不同微生物间的协同互动,增强降解体系在复杂环境中的功能稳定性,有效克服单一菌株适应性不足的瓶颈。最后,整合基因组学、转录组学、蛋白组学、代谢组学等多组学技术,并结合计算生物学模型,系统解析烟碱降解的调控机制和瓶颈节点,并对关键代谢途径进行理性设计与精准优化,以提高烟碱降解效率。

参考文献:

- [1] 付晨青,全银杏,王风芹,等.我国烟秆资源分布与利用途径[J].纤维素科学与技术,2015,23(2):74-79.
- FU C Q, TONG Y X, WANG F Q, et al. Resources distribution and the utilization way of tobacco stem in China[J]. Journal of Cellulose Science and Technology, 2015, 23(2): 74-79.
- [2] LI H J, LI X M, DUAN Y Q, et al. Biotransformation of nicotine by microorganism: The case of *Pseudomonas* spp [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 86(1): 11-17.
- [3] CIVILINI M, DOMENIS C, SEBASTIANUTTO N, et al. Nicotine decontamination of tobacco agro-industrial waste and its degradation by micro-organisms [J]. Waste Management & Research, 1997, 15(4): 349-358.
- [4] CHEN B, SUN L L, ZENG G Y, et al. Gut bacteria alleviate smoking-related NASH by degrading gut nicotine [J]. Nature, 2022, 610(7932): 562-568.
- [5] HENDERSON E, RODRIGUEZ GUERRERO L A, CONTINENTE X, et al. Measurement of airborne nicotine, as a marker of secondhand smoke exposure, in homes with residents who smoke in 9 European countries [J]. Environmental Research, 2023, 219: 115118.
- [6] SINGHAL A, JAISWAL P K, THAKUR I S. Biopulping of bagasse by *Cryptococcus albidus* under partially sterilized conditions [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 97: 143-150.
- [7] ZHANG L Y, MAI J, SHI J F, et al. Study on tobacco quality improvement and bacterial community succession during microbial co-fermentation[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 208: 117889.
- [8] 申星,张娟,彭宇,等.一株降解烟碱烟草内生菌的筛选与鉴定[J].农产品加工(学刊),2013(14):69-71.
- SHEN X, ZHANG J, PENG Y, et al. Screening and identification of one nicotine degrading tobacco entophytes [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2013(14): 69-71.
- [9] WITTENBERG R E, WOLFMAN S L, DE BIASI M, et al. Nicotinic acetylcholine receptors and nicotine addiction: A brief introduction [J]. Neuropharmacology, 2020, 177: 108256.
- [10] AL-DAHCHAN W H, KADHOM M, YOUSIF E, et al. Extraction and determination of nicotine in tobacco from selected local cigarettes brands in Iraq [J]. Letters in Applied NanoBioScience, 2022, 11(1): 3278-3290.
- [11] 龙章德,韦方立,李俊芳,等.一株高浓度烟碱降解菌的筛选、分离和初步鉴定[J].基因组学与应用生物学,2013,32(5):612-615.
- LONG Z D, WEI L F, LI J F, et al. Screening, isolation and identification of a high concentration nicotine degradation bacterium strain [J]. Genomics and Applied Biology, 2013, 32(5): 612-615.
- [12] VEROVŠEK T, HEATH D, HEATH E. Occurrence, fate and determination of tobacco (nicotine) and alcohol

- (ethanol) residues in waste-and environmental waters [J]. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 2022, 34: e00164.
- [13] LISUMA J B, MBEGA E R, NDAKIDEMI P A. Nicotine release at the tobacco rhizosphere and their adsorption capacities in different soil textures [J]. Rhizosphere, 2020, 15: 100210.
 - [14] MAITI M, SARKAR M, LIU D H. Mechanism of nicotine degradation and adsorption by a nano-TiO₂ engineered reduced graphene oxide composite in light variant conditions [J]. Catalysis Science & Technology, 2020, 10 (9): 2797–2809.
 - [15] LISUMA J, MBEGA E, NDAKIDEMI P. Influence of nicotine released in soils to the growth of subsequent maize crop, soil bacteria and Fung [J]. Life Sciences and Bio-engineering, 2019, 22: 1–12.
 - [16] YANG C Y, YAN B. Dual-function platform based on postsynthetic functionalization of a water-stable hydrogen-bonded organic framework: Ratiometric sensing of nicotine and cotinine and dynamic anticounterfeiting for information encryption [J]. Inorganic Chemistry, 2023, 62 (49): 20458–20466.
 - [17] 杨全柳. 烤烟新品系 YZ15 的选育和特性特征研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2023.
YANG Q L. Breeding and characterization of a new flue-cured tobacco strain YZ15 [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023.
 - [18] MOLINA-HIDALGO F J, VAZQUEZ-VILAR M, D' ANDREA L, et al. Engineering metabolism in *Nicotiana* species: A promising future [J]. Trends in Biotechnology, 2021, 39(9): 901–913.
 - [19] LEWIS R S, LOPEZ H O, BOWEN S W, et al. Transgenic and mutation-based suppression of a berberine bridge enzyme-like (BBL) gene family reduces alkaloid content in field-grown tobacco [J]. PLoS One, 2015, 10 (2): e0117273.
 - [20] JAVED M, KASHIF M, ALI A, et al. Assessing impact of manual topping and suckericide application at different stages on FCV tobacco quality and yield [J]. Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology, 2024, 12(4): 596–600.
 - [21] LI L, ZHANG H F, WEN J, et al. Direct determination of free nicotine content in tobacco [J]. ACS Omega, 2022, 7 (27): 23061–23068.
 - [22] 许志文, 王梦雅, 谭淞彦, 等. 降低烟草工业废弃物中烟碱含量的研究 [J]. 天津农业科学, 2022, 28 (5): 81–86.
XU Z W, WANG M Y, TAN S Y, et al. Study on reducing nicotine content in tobacco industry waste [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2022, 28(5): 81–86.
 - [23] 李振杰, 王钰田, 蒋昆明, 等. 烟梗丝模板制备 TiO₂ 及其光催化降解尼古丁的研究 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2791–2798.
 - LI Z J, WANG Y T, JIANG K M, et al. Study on preparation of TiO₂ by tobacco stem as a template and its photocatalytic degradation of Nicotine [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(5): 2791–2798.
 - [24] QI C X, CHEN H X, CHEN X F, et al. In-situ-reduced synthesis of cyano group modified g-C₃N₄/CaCO₃ composite with highly enhanced photocatalytic activity for nicotine elimination [J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 126: 517–530.
 - [25] LI Z J, YANG D D, WEI Z Y, et al. Reduction of nicotine content in tobacco through microbial degradation: Research progress and potential applications [J]. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 2024, 17(1): 144.
 - [26] 苏丹, 林智慧, 王雪仁, 等. 1株高效降烟碱烟草内生菌的筛选、鉴定及其代谢途径研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(3): 279–286.
SU D, LIN Z H, WANG X R, et al. Screening and identification of a highly efficient nicotine-degrading endophyte in tobacco and its metabolic pathways [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52 (3): 279–286.
 - [27] WANG H H, YIN B, PENG X X, et al. Biodegradation of nicotine by newly isolated *Pseudomonas* sp. CS3 and its metabolites [J]. Journal of Applied Microbiology, 2012, 112(2): 258–268.
 - [28] GONG X W, YANG J K, DUAN Y Q, et al. Isolation and characterization of *Rhodococcus* sp. Y22 and its potential application to tobacco processing [J]. Research in Microbiology, 2009, 160(3): 200–204.
 - [29] 韩娜娜. 烟碱降解细菌的筛选及应用研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2019.
HAN N N. Study on the screening and application of nicotine-degrading bacteria [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2019.
 - [30] TSURUTA T, UMENAI D, HATANO T, et al. Screening micro-organisms for cadmium absorption from aqueous solution and cadmium absorption properties of *Arthrobacter nicotianae* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2014, 78(10): 1791–1796.
 - [31] RATHBONE D A, LISTER D L, BRUCE N C. Biotransformation of alkaloids [J]. The Alkaloids Chemistry and Biology, 2002, 58: 1–82.
 - [32] 夏振远, 雷丽萍, 吴玉萍, 等. 降烟碱细菌-烟草节杆菌 K9 的分离及鉴定 [J]. 中国烟草科学, 2006, 27(2): 1–4.
XIA Z Y, LEI L P, WU Y P, et al. Isolation and identification of degrading nicotine bacteria-*Arthrobacter nicotianae* strain K9 [J]. Chinese Tobacco Science, 2006, 27(2): 1–4.

- [33] RUAN A D, MIN H, PENG X H, et al. Isolation and characterization of *Pseudomonas* sp. strain HF-1, capable of degrading nicotine [J]. Research in Microbiology, 2005, 156(5/6): 700–706.
- [34] XU Z Y, ZHANG T T, HU H Y, et al. Characterization on nicotine degradation and research on heavy metal resistance of a strain *Pseudomonas* sp. NBB [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 459: 132145.
- [35] ZHAO L, ZHU C J, GAO Y, et al. Nicotine degradation enhancement by *Pseudomonas stutzeri* ZCJ during aging process of tobacco leaves [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2012, 28(5): 2077–2086.
- [36] RAMAN G, MOHAN K, MANOHAR V, et al. Biodegradation of nicotine by a novel nicotine-degrading bacterium, *Pseudomonas plecoglossicida* TND35 and its new biotransformation intermediates [J]. Biodegradation, 2014, 25(1): 95–107.
- [37] YIN R, CHANG M D, MA R, et al. Insights into the imidaclothiz biodegradation by the white-rot fungus *Phanerochaete sordida* YK-624 under ligninolytic conditions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(21): 12877–12886.
- [38] LIU J L, MA G H, CHEN T, et al. Nicotine-degrading microorganisms and their potential applications [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(9): 3775–3785.
- [39] MENG X J, LU L L, GU G F, et al. A novel pathway for nicotine degradation by *Aspergillus oryzae* 112822 isolated from tobacco leaves [J]. Research in Microbiology, 2010, 161(7): 626–633.
- [40] WANG Y T, LUO X Y, CHU P, et al. Cultivation and application of nicotine-degrading bacteria and environmental functioning in tobacco planting soil [J]. Bioresources and Bioprocessing, 2023, 10(1): 10.
- [41] 苏丹. 降烟碱内生菌的筛选、鉴定及降解特性研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2020.
- SU D. Isolation and identification of nicotine-degrading endophytes and its degradation characteristics [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.
- [42] KACHALOVA G S, BOURENKOV G P, MENGESDORF T, et al. Crystal structure analysis of free and substrate-bound 6-hydroxy-l-nicotine oxidase from *Arthrobacter nicotinovorans* [J]. Journal of Molecular Biology, 2010, 396(3): 785–799.
- [43] WANG H X, ZHI X Y, QIU J G, et al. Characterization of a novel nicotine degradation gene cluster *ndp* in *Sphingomonas melonis* TY and its evolutionary analysis [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 337.
- [44] DENG M Q, BASAK P, ZHANG Y H, et al. An update in recent research on nicotine contamination and nicotine-degrading microorganisms [J]. Toxicon, 2025, 254: 108209.
- [45] AHMAD S, CUI D M, ZHONG G H, et al. Microbial technologies employed for biodegradation of neonicotinoids in the agroecosystem [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 759439.
- [46] LIAO S, CHENG X X, ZHU L J, et al. Revealing the mechanism of nicotine pyrolysis: Insights from DFT calculations [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2023, 176: 106245.
- [47] WANG S N, LIU Z, XU P. Biodegradation of nicotine by a newly isolated *Agrobacterium* sp. strain S33 [J]. Journal of Applied Microbiology, 2009, 107(3): 838–847.
- [48] RANA S, GUPTA V. Microbial degradation of second generation Neonicotinoid: Thiamethoxam in clay loam soils [J]. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 2019, 8(1S): 294–298.
- [49] HEGDE D, MANOHARAN T, SRIDAR R. Identification and characterization of bacterial isolates and their role in the degradation of neonicotinoid insecticide thiamethoxam [J]. Journal of Pure and Applied Microbiology, 2017, 11(1): 393–400.
- [50] BRIŠKI F, HORGAS N, VUKOVIĆ M, et al. Aerobic composting of tobacco industry solid waste: Simulation of the process [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2003, 5(3): 295–301.
- [51] 王瑞, 施河丽, 陈守文. 烟碱降解菌的分离、鉴定及其在烟草秸秆发酵中的应用研究 [C]//中国烟草学会. 中国烟草学会 2015 年度优秀论文汇编, 2015: 1212–1224.
- WANG R, SHI H L, CHEN S W. Isolation of nicotine degradation bacterium strain and its application in the tobacco straw organic fertilizer composting fermentation [C]//China Tobacco Society. Outstanding Thesis Compilation of China Tobacco Society 2015 Annual, 2015: 1212–1224.
- [52] SHAO Y, ZHONG H, MAO X, et al. Biochar-immobilized *Sphingomonas* sp. and *Acinetobacter* sp. isolates to enhance nutrient removal: Potential application in crab aquaculture [J]. Aquaculture Environment Interactions, 2020, 12: 251–262.
- [53] 郑小嘎, 张修国, 张天宇, 等. 真菌菌剂改善烟叶品质的初步研究 [J]. 微生物学通报, 2003, 30(6): 10–13.
- ZHENG X G, ZHANG X G, ZHANG T Y, et al. Improving tobacco quality by fungal leavens [J]. Microbiology China, 2003, 30(6): 10–13.
- [54] 刘春奎, 刘春玲, 刘会杰, 等. 烤烟型卷烟烟气主要化学成分与感官质量的关系 [J]. 南方农业学报, 2021, 52(6): 1665–1673.
- LIU C K, LIU C L, LIU H J, et al. Relationship between main chemical components and sensory quality of flue-cured cigarette [J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(6): 1665–1673.
- [55] 刘春奎, 贾琳. 烟叶分级 [M]. 北京: 中国纺织出版社, 2024.

LIU C K, JIA L. Tobacco grading [M]. Beijing: China Textile Press, 2024.

[56] YANG Y, PENG Q R, OU M Y, et al. Research progress in tobacco fermentation [J]. Journal of Biosciences and Medicines, 2018, 6(6): 105-114.

[57] HRITCU L, MIHASAN M. 6-hydroxy-l-nicotine and memory impairment[M]//PREEDY V R. Neuroscience of nicotine: Mechanisms and treatment. Amsterdam: Elsevier, 2019: 165-172.

[58] BOIANGIU R S, MIHASAN M, GORGAN D L, et al. Anxiolytic, promnesic, anti-acetylcholinesterase and antioxidant effects of cotinine and 6-hydroxy-L-nicotine in scopolamine-induced zebrafish (*Danio rerio*) model of Alzheimer's disease[J]. Antioxidants, 2021, 10(2): 212.

[59] XUE S, SCHLOSBERG J E, JANDA K D. A new strategy for smoking cessation: Characterization of a bacterial enzyme for the degradation of nicotine [J]. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137(32): 10136-10139.

Research progress on microbial degradation of nicotine

ZENG Chang¹, LIU Lulu², WANG Zewei¹, ZHU Chun¹, XU Yadong¹, SU Erzhen², WU Rong²

1. Nanjing Cigarette Factory, China Tobacco Jiangsu Industrial Co., Ltd., Nanjing 210019;
2. College of Light Industry and Food Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: Nicotine is the primary alkaloid in tobacco and its processing waste, featuring strong environmental persistence and high biotoxicity. Its emission poses potential hazards to the ecological environment and human health, rendering nicotine degradation a critical link in the green development of the tobacco industry and tobacco processing waste treatment. Compared with agricultural regulation measures, physical and chemical methods—which have limitations in energy consumption, cost, and aroma quality, microbial degradation has attracted considerable attention due to its high efficiency, specificity, and environmental benignity. This paper systematically summarizes the physicochemical properties of nicotine, treatment methods, as well as the main microbial groups for nicotine degradation, their degradation characteristics, and metabolic pathways. Genera such as *Arthrobacter* and *Pseudomonas* are currently the most extensively studied nicotine-degrading microorganisms, and they primarily convert nicotine into small-molecular-weight metabolites that can enter the tricarboxylic acid cycle via the pyridine pathway, pyrrolidine pathway, and VPP pathway, with key degrading enzymes playing a central role in these metabolic pathways. Additionally, this paper outlines the application prospects of microbial degradation of nicotine in fields including bioremediation of tobacco waste, tobacco processing and manufacturing, and biopharmaceuticals. Future research will address issues such as the poor environmental adaptability and unstable degradation efficiency of strains, and will focus on developing customized strains, constructing synthetic microbial communities, conducting multi-omics analysis, and optimizing metabolic processes to promote the industrialization of microbial nicotine degradation technology.

Key words: microbial degradation; nicotine; tobacco processing; waste governance

[责任编辑: 王晓波 刘春奎]