

油菜秸秆还田下油枯配施腐熟剂对土壤微环境及烟叶产质量的影响^①

李 智¹, 杨启港¹, 夏荣帅², 韦建玉¹, 邱学礼³, 余小芬^{3*}, 敖金成^{4*}, 毛妍婷³, 李自武²

(1 广西中烟工业有限责任公司, 南宁 530001; 2 曲靖市烟草公司罗平县分公司, 云南曲靖 655800; 3 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205; 4 文山学院三七医药学院(三七研究院), 云南文山 663000)

摘 要: 为探究油菜秸秆还田条件下油枯配施腐熟剂对烤烟根际土壤微环境及烟叶产质量的影响, 本研究以罗平县“油菜-烤烟”闭环栽培模式为研究对象, 采用大田试验, 对比分析了不同处理对土壤理化性质、酶活性、细菌群落结构及烟叶经济性状、上部烟叶品质的调控效应。结果表明: 与对照相比, 油枯配施腐熟剂处理明显改善土壤肥力状况, 土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量及 CEC 分别提升了 4.6%~13.7%、3.2%~12.9%、4.0%~18.1%、10.7%~57.9% 和 3.9%~16.5%, pH 提高了 0.2~0.9 个单位, 脲酶、蔗糖酶、硝酸还原酶活性分别提高了 2.9%~17.0%、3.5%~56.5%、0~50.0%, 过氧化氢酶活性降低了 2.4%~50.0%; 各处理明显提升烟株根际土壤细菌群落多样性, 优势菌群变形菌门(Proteobacteria)相对丰度提高了 6.1%~37.8%, 其鞘氨醇单胞属(*Sphingomonas*)相对丰度提高了 4.8%~90.7%, 而酸杆菌门(Acidobacteriota)相对丰度降低了 18.9%~50.9%; 冗余分析显示, 土壤全氮、有机质含量是影响土壤细菌群落丰度的核心环境因子; 油枯配施腐熟剂处理有效提高烟叶产量和产值, 改善 B₂F 等级烟叶化学成分协调性。可见, 油菜秸秆还田条件下, 油枯配施腐熟剂在改良土壤、改善上部烟叶品质方面具有正效应, 整体以油枯 450 kg/hm²+腐熟剂 45 kg/hm²配施处理调控效应较优。研究结果为消减产区油菜秸秆就地还田弊端提供了新的途径。

关键词: 秸秆还田; 烤烟; 高通量测序; 腐熟剂; 烟油轮作

中图分类号: S154.36 **文献标志码:** A

Effects of Rapeseed-cake Combined with Decomposing Agent on Soil Bacterial Community and Yield and Quality of Tobacco Leaf Under Rape Straw Returning

LI Zhi¹, YANG Qigang¹, XIA Rongshuai², WEI Jianyu¹, QIU Xueli³, YU Xiaofen^{3*}, AO Jincheng^{4*}, MAO Yanting³, LI Ziwu²

(1 China Tobacco Guangxi Industrial Co., Ltd., Nanning 530001, China; 2 Luoping Branch of Qujing Tobacco Company, Qujing, Yunnan 655800, China; 3 Agricultural Resources & Environment Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 4 College of Sanqi Medicine and Pharmacy (Sanqi Research Institute), Wenshan University, Wenshan, Yunnan 663000, China)

Abstract: To investigate the effects of combined application of rapeseed-cake and decomposing agent under the condition of rapeseed straw returning on the rhizosphere soil microenvironment and the yield and quality of flue-cured tobacco, this study took the “rapeseed-tobacco” closed-loop cultivation mode in Luoping County as the research object, conducted a field experiment, and compared and analyzed the regulatory effects of different treatments on soil physicochemical properties, enzyme activities, bacterial community structure, as well as tobacco economic traits and the quality of upper tobacco leaves. The results showed that, compared with the control, the treatments with rapeseed-cake and decomposing agent significantly improved soil fertility. Specifically, soil organic matter, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, available potassium, and cation exchange capacity (CEC) increased by 4.6%–13.7%, 3.2%–12.9%, 4.0%–18.1%, 10.7%–57.9%, and 3.9%–16.5%, and pH increased by 0.2–0.9 units, respectively. In terms of soil enzyme activities, the treatments with rapeseed-cake and decomposing agent significantly enhanced urease (2.9%–17.0%), sucrase (3.5%–56.5%), and nitrate reductase activities (0–50.0%), whereas catalase

①基金项目: 广西中烟工业有限责任公司科技项目(GXZYCX2022B009)、国家重点研发计划项目(2022YFD1901504-06)和云南省农业基础研究联合专项(202301BD070001-046)资助。

* 通信作者(ecojin2023@163.com; 184679139@qq.com)

作者简介: 李智(1983—), 男, 广西柳州人, 硕士, 农艺师, 主要研究方向为烟草栽培及烟叶管理新技术。E-mail: 253958161@qq.com

activity decreased by 2.4%–50.0%. Microbial community analysis revealed that the treatments with rapeseed-cake and decomposing agent significantly increased soil bacterial diversity, with the relative abundance of Proteobacteria increasing by 6.1%–37.8% and its subordinate genus *Sphingomonas* increasing by 4.8%–90.7%, while the relative abundance of Acidobacteriota decreased by 18.9%–50.9%, respectively. Redundancy analysis showed that soil TN and SOM contents were the core environmental factors affecting the abundance of bacterial communities. These treatments effectively promoted the yield and output value of tobacco leaves, improved the coordination of chemical components of B₂F grade tobacco leaves. In conclusion, under the rape straw returning to the field, the application of decomposing agent or rapeseed-cake+decomposing agent can improve the yield and quality of tobacco leaves, and the overall effect of 450 kg/hm² rapeseed-cake + 45 kg/hm² decomposing agent was better, which is suitable for rape-tobacco closed-loop cultivation in Luoping County tobacco-planting.

Key words: Straw returning; Flue-cured tobacco; High-throughput sequencing; Decomposing agent; Rapeseed-tobacco rotation

烤烟(*Nicotiana tabacum*)-油菜(*Brassica campestris*)轮作是云南省曲靖市罗平县的特色种植体系,通过“夏烟-冬油”的季节性衔接实现耕地高效利用。统计数据显示,罗平油菜常年种植面积约 4.7 万 hm²,烤烟种植面积约 1.3 万 hm²,形成显著的粮经协同生产格局^[1]。陈华等^[2]通过田间定位试验证实“油菜-烤烟”是西南山地农业的一种典型范式。值得注意的是,油菜秸秆作为轮作系统的关键物质载体,其干物质钾含量可达 2.8%~3.5%(质量分数)^[3],这为烤烟等喜钾作物的化学钾肥替代提供了可行性依据^[4]。然而,田间观测数据表明,秸秆直接还田存在养分释放滞后现象^[5]。在秸秆全域禁烧政策背景下,传统焚烧秸秆处理路径的阻断导致全县年生产约 35 万 t 油菜秸秆面临利用瓶颈。因此,构建适宜高原红壤特性的秸秆快速腐解技术体系,已成为破解耕地质量保育与烟叶品质协同提升难题的关键突破口,对促进区域低碳农业发展具有重要实践价值。

尽管秸秆还田的土壤改良与作物增产效应已通过大量田间试验得以验证^[6-7]。但近年来研究揭示,在机械化秸秆全量还田背景下,多种负面效应呈现显著关联性^[8],如增加土壤病原库和害虫虫口数,生物胁迫加剧;发生养分时空错位竞争导致秸秆腐解初期引发作物“氮饥饿效应”;增强了土壤物理结构扰动,诱发根系悬空导致“吊根”现象发生等。此类多重负面效应叠加形成的复合障碍,已对农田生态安全造成潜在隐患与不利冲击,亟待依托时空耦合的秸秆还田调控技术体系,精准阻控并消减秸秆还田带来的生态风险。

油枯(饼肥)作为油料加工副产物,是一种优良的养分源材料。武雪萍等^[9]研究指出,饼肥中的有机碳、氮分解快,满足了烟草最大吸收期对氮的需要,经发酵腐熟的饼肥氮素释放规律符合烤烟对氮素需求规律。李亮等^[10]研究发现,以 30% 菜籽饼肥+70% 芝

麻饼肥替代 100% 芝麻饼肥既能节约成本,又能改善烟田生物学特性,平衡烤烟氮素营养,提升烟叶品质。在秸秆资源化利用领域,由于秸秆富含难降解的木质纤维素组分导致自然腐解缓慢,严重制约转化利用^[11]。而施用腐秆剂则可加速秸秆腐解^[12],有利于改善土壤理化性质,促进作物生长发育^[13]。程培军等^[14]研究结果显示,饼肥与微生物菌剂联用对植烟土壤表现出良好的改良和烟叶提质效应,但该研究未涉及油菜秸秆还田条件下油枯与腐熟剂的交互效应。基于此,本研究以云南省罗平县烟油轮作体系为研究对象,探究油菜秸秆还田条件下,油枯配施腐熟剂对土壤微生态环境及烟叶产质量的影响。研究成果旨在揭示油料副产物与微生物共代谢对土壤-作物系统的级联调控机制,并为高原红壤区农业废弃物闭环利用提供创新解决方案。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2023 年 4—9 月在云南省曲靖市罗平县板桥镇(104°23'E, 24°54'N)核心烟区进行。试验点地处云贵高原喀斯特溶蚀地貌带,海拔 1 437.5 m,受西南季风与地形抬升耦合作用,形成干湿季明显的山地立体气候(年均温 15.1 °C, ≥10 °C 有效积温 4 786 °C)^[15],其降水年际分配呈现典型单峰性特征,6—9 月降水量占全年总量的 78.3%。供试土壤类型为红壤,耕作层(0~20 cm)基础理化性质为: pH 5.8, 有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 34.1 g/kg、73.5 mg/kg、71.7 mg/kg、275.0 mg/kg。

1.2 试验设计

本试验采用裂区设计,主区为油枯施用量梯度(Y0: 0 kg/hm²; Y1: 450 kg/hm²),副区为腐熟剂施用量梯度(F0~F3: 0、15、30、45 kg/hm²),共形成 8 种处理组合(Y0F0~Y1F3)。其中油枯施用量参照文献

[16]的烟田有机改良阈值确定,腐熟剂梯度设置依据菌剂有效活菌数($\geq 2.0 \times 10^9$ CFU/g)的田间推荐用量。施肥体系基于氮素平衡原则:施氮量以纯氮计为 105.0 kg/hm^2 (基追比 6:4),基肥选用烟草专用复合肥(N:P₂O₅:K₂O=8:8:15, 750 kg/hm^2),追肥选用高钾型追肥(N:P₂O₅:K₂O=15:0:33, 300 kg/hm^2),施钾量依据田间烤烟需求调节。试验采用随机区组排列,3次重复,小区面积 66.7 m^2 (行株距 $1.2 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$)。

供试烤烟品种为云烟 87,于 2023 年 5 月 6 日采用井窖式移栽,7 月 13 日封顶并化学抑芽,9 月 21 日采烤结束。大田其他管理参照当地优质烟叶规范化生产进行。于初花期(6 月 28 日)每小区选取 3 株代表性烟株采集根际土。按 0~20 cm 根际土采集法获取样品,取少量于冻存管中经液氮速冻后带回实验室 -80 °C 超低温冰箱保存备用,另取 500 g 带回实验室风干后过 2 mm 筛测定理化性质。

供试腐熟剂购自北京恩格兰环境技术有限公司,主要菌种为枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*),有效活菌数 $\geq 5.0 \times 10^8$ CFU/g;菜籽油枯来自网购。菜籽油枯和腐熟剂于烤烟还苗后按比例混合,用细土充分拌匀后环施于烟株周围并覆薄土。

1.3 检测项目及方法

1.3.1 土壤理化性质 参考文献[17]方法测定土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾及蔗糖酶、过氧化氢酶、脲酶和硝酸还原酶活性。

1.3.2 土壤 DNA 提取与测序 土壤样品的 DNA 检测及分析委托上海美吉生物医药科技有限公司(<https://www.majorbio.com/>)完成。首先采用 E.Z.N.A.® Soil DNA Kit DNA(Omega, 美国)试剂盒提取 DNA,并通过 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测抽提基因组 DNA 质量,随后使用 NanoDro2000(Thermo Fisher Scientific, 美国)进行 DNA 纯化和浓度测定。采用带有 Barcode 的特异引物 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')对 16S rDNA 基因的 V3~V4 区进行 PCR 扩增,每个样品扩增 3 次取平均值。PCR 产物经 Qubit 4.0 (Thermo Fisher Scientific, 美国)定量检测后,使用 TruSeqTM DNA Sample Prep Kit 进行文库构建,后在 Illumina PE300/PE250 平台上完成高通量测序。

1.3.3 烟叶品质分析 挂牌烘烤,烤后烟叶充分回潮后,调查烟叶经济性状。每个处理随机选取上桔二(B₂F)等级烟叶 1.0 kg,参照烟草行业标准^[18-23]测定烟

叶总糖、还原糖、烟碱、总氮、钾、氯及淀粉含量,计算糖碱比、氮碱比及钾氯比值。

1.4 数据处理与统计分析

分别采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件进行数据统计和方差分析。生信分析通过 UPARSE (version 7.1) 软件平台进行,以 97% 的相似度对操作分类单元(Operational taxonomic units, OTU)进行聚类并剔除嵌合体序列;利用 MOTHUR (version 1.30.2)软件计算 α 多样性指数。采用 LEfSe 分析(Linear discriminant analysis Effect Size)筛选从门到属水平上具有显著差异的细菌类群(LDA>2, $P<0.05$)。使用基于距离的冗余分析(Distance-based redundancy analysis, db-RDA)探究土壤理化指标与土壤细菌群落结构的关联性。群落统计分析及可视化作图利用 R 语言的 Vegan 包(version 2.1-5)进行。

2 结果与分析

2.1 油菜秸秆还田条件下油枯配施腐熟剂对土壤理化性质及酶活性的影响

2.1.1 对土壤理化性质的影响 与对照(Y0F0)相比,油枯配施腐熟剂处理明显改善烤烟根际土壤理化性质(表 1)。具体而言,各处理根际土 pH 较 Y0F0 提高了 0.2~0.9 个单位,其中 Y0F2、Y0F3、Y1F1 差异显著($P<0.05$,下同)。同时,油枯配施腐熟剂处理明显提高土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾及阳离子交换量(CEC),增幅分别介于 4.6%~13.7%、3.2%~12.9%、4.0%~18.1%、10.7%~57.9%、3.9%~16.5%。除 Y0F3 和 Y1F0 处理土壤有效磷含量低于 Y0F0 外,其余处理均高于 Y0F0,其中 Y0F1 处理显著提高。综上,油菜秸秆还田条件下,油枯、腐熟剂互作能有效提升土壤养分含量和 pH。

2.1.2 对土壤主要酶活性的影响 从表 2 可知,与 Y0F0 相比,油枯配施腐熟剂土壤过氧化氢酶活性降低了 2.4%~50.0%,硝酸还原酶活性提高了 0~50.0%,但处理间规律性不明显。单独施用腐熟剂时,随着腐熟剂施用量的增加,蔗糖酶活性分别提高了 3.5%、42.8% 和 24.7%;而配施模式下,Y1F1、Y1F2、Y1F3 的蔗糖酶活性分别显著提高了 41.0%、50.5%、56.5%,各处理间脲酶活性差异不显著,但相较于 Y0F0 提高了 2.9%~17.0%。综上,油菜秸秆还田条件下,增加腐熟剂用量或油枯配施腐熟剂有利于提高土壤蔗糖酶、脲酶活性,对过氧化氢酶、硝酸还原酶活性的影响规律不明显。

表 1 油枯配施腐熟剂对烟株根际土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of rapeseed-cake combined with decomposing agent on physicochemical properties in rhizosphere soil of tobacco plant

处理	pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	阳离子交换量(cmol/kg)
Y0F0	5.2±0.5b	50.3±0.8d	3.1±0.1c	210.6±15.5c	94.4±5.6bc	471.1±89.2d	12.7±1.7c
Y0F1	5.7±0.2b	53.9±4.7bc	3.5±0.6a	219.3±16.0c	117.2±9.4a	521.5±89.6d	13.4±1.5bc
Y0F2	5.8±0.1a	53.5±2.4bc	3.2±0.2bc	216.2±6.9c	96.8±5.8bc	637.5±51.4bc	13.5±1.1abc
Y0F3	6.1±0.4a	54.3±0.9bc	3.2±0.1bc	219.1±10.3c	77.9±12.7d	598.0±43.1c	14.8±1.8a
Y1F0	5.4±0.2b	53.2±0.4bc	3.2±0.1bc	238.3±4.9ab	92.9±3.1c	619.3±35.3c	13.2±0.8bc
Y1F1	5.8±0.3a	57.2±2.8a	3.4±0.2ab	233.6±8.9b	95.1±4.6bc	744.0±57.5a	14.4±0.7ab
Y1F2	5.4±0.1b	52.8±1.7c	3.3±0.1abc	239.7±11.8ab	102.0±6.5bc	693.5±51.2ab	13.9±1.0abc
Y1F3	5.4±0.1b	55.6±0.9ab	3.4±0.0ab	248.7±2.4a	103.6±8.5b	702.7±52.0a	13.8±0.6abc

注：同列数据小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平，下同。

表 2 油枯配施腐熟剂对烟株根际土壤主要酶活性的影响

Table 2 Effects of rapeseed-cake combined with decomposing agent on main enzyme activities in rhizosphere soil of tobacco plant

处理	过氧化氢酶(mmol/(g·h))	硝酸还原酶(μmol/(g·d))	蔗糖酶(mg/(g·d))	脲酶(mg/(g·d))
Y0F0	329.6±67.7a	0.8±0.2b	28.3±3.1c	209.1±15.0a
Y0F1	225.6±15.2c	0.8±0.2b	29.3±6.3c	215.2±18.8a
Y0F2	212.0±11.5c	1.2±0.0a	40.4±3.6ab	221.4±21.8a
Y0F3	219.7±62.4c	1.0±0.1ab	35.3±5.8abc	244.6±27.3a
Y1F0	232.7±42.7bc	1.2±0.2a	32.4±3.2bc	218.8±16.8a
Y1F1	239.6±57.2abc	1.1±0.1ab	39.9±3.7ab	217.6±18.8a
Y1F2	164.9±47.2c	0.9±0.3ab	42.6±8.2ab	220.7±10.0a
Y1F3	321.6±25.3ab	1.2±0.3a	44.3±2.7a	223.3±2.9a

2.2 油菜秸秆还田下油枯配施腐熟剂对土壤细菌群落结构的影响

2.2.1 对土壤细菌群落 α 多样性的影响 油枯配施腐熟剂对土壤细菌群落结构和多样性产生了显著影响(表 3)。与 Y0F0 相比，油枯配施腐熟剂处理均明显提高土壤细菌群落 Sobs、Chaol 指数，以 F1Y3 处理提升效果最为显著。Y0F0、Y0F2 处理 Shannon

指数一致，均显著低于 Y0F1、Y1F0、Y1F1，与其他处理相比差异不显著。各处理 Coverage 指数均大于 96%，处理间差异不显著，说明测序深度均已达到。此外，Y1F1 和 Y1F3 处理 PD 指数较 Y0F0 处理显著提高，增幅分别为 59.9%、76.3%。综上，油菜秸秆还田条件下，油枯配施腐熟剂均有利于提高土壤细菌群落 α 多样性，整体以 Y1F3 处理效果最佳。

表 3 油枯配施腐熟剂对土壤细菌群落多样性的影响

Table 3 Effects of rapeseed-cake combined with decomposing agent on soil bacterial community diversities

处理	Sobs 指数	Shannon 指数	Chaol 指数	Coverage 指数(%)	PD 指数
Y0F0	3 358.3±1 098.3c	5.7±0.7b	4 286.3±481.9c	96.8±2.2a	255.6±60.6c
Y0F1	4 779.3±774.1abc	7.0±0.1a	5 754.3±285.0abc	97.3±1.8a	374.8±68.5abc
Y0F2	3 883.3±370.7bc	5.7±1.1b	5 088.6±1 254.8abc	97.2±1.9a	295.8±9.6bc
Y0F3	4 700.3±469.6abc	6.7±0.1ab	5 976.1±346.7ab	96.7±1.3a	339.9±55.6abc
Y1F0	4 829.7±855.1abc	6.9±0.2a	5 556.7±501.7abc	97.3±2.3a	364.3±69.0abc
Y1F1	4 978.3±453.7ab	6.9±0.1a	5 014.5±491.3abc	99.4±0.4a	408.7±35.0ab
Y1F2	4 627.0±150.8abc	6.3±0.3ab	4 852.7±195.4bc	96.8±2.3a	300.9±58.7abc
Y1F3	5 981.0±1 208.0a	6.7±0.1ab	6 541.3±1 260.7a	98.3±2.1a	450.7±78.4a

2.2.2 对土壤细菌群落组成的影响 门水平上(图 1A)，土壤细菌群落相对丰度前 3 位的优势细菌门依次为变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门

(Actinobacteriota)、酸杆菌门(Acidobacteriota)。与 Y0F0 处理相比，油枯腐熟剂配施处理土壤变形菌门相对丰度提高了 6.1%~37.8%，其中 Y1F2 处理增幅

最大；而酸杆菌门相对丰度则降低了 18.9%~50.9%，同样以 Y1F2 处理降幅最大。此外，Y1F0~Y1F3 处理放线菌门相对丰度提高了 6.9%~15.1%，但 Y0F1~Y0F3 处理相对丰度降低了 2.3%~32.8%。值得注意的是，Y0F1、Y0F2 处理厚壁菌门(Firmicutes)相对丰度显著高于其他处理。除 Y1F0 处理绿弯菌门(Chloroflexi)相对丰度高于 Y0F0 外，其余处理均降低。

属水平上(图 1B)，除 Y0F1(21.6%)、Y0F2(16.4%)处理梭菌属(*Clostridium_sensu_stricto_1*)相对丰度占绝对优势外，其余处理土壤细菌群落相对丰度前 5 位的优势菌属分别为鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、节杆菌属(*Arthrobacter*)、norank_f_norank_o_Vicinamibacterales、norank_f_Vicinamibacteraceae 和

norank_f_Gemmatimonadaceae，其累积相对丰度总和介于 18.6%~38.0%。与 Y0F0 相比，油枯腐熟剂配施处理土壤鞘氨醇单胞菌属相对丰度提高了 4.8%~90.7%，以 Y0F3 处理增幅最大；除 Y0F1 处理节杆菌属相对丰度降低 7.1% 外，其余处理提高了 28.6%~146.4%，以 Y1F2 处理增幅最高；此外，油枯腐熟剂配施处理土壤 norank_f_norank_o_Vicinamibacterales 和 norank_f_Vicinamibacteraceae 相对丰度分别降低了 1.5%~49.2% 和 30.9%~65.5%，以 Y1F2 处理降幅最大。综上，油菜秸秆还田条件下，油枯配施腐熟剂明显提高变形菌门及其鞘氨醇单胞菌属和放线菌门及其节杆菌属的相对丰度，明显降低了 norank_f_norank_o_Vicinamibacterales 和 norank_f_Vicinamibacteraceae 的相对丰度。

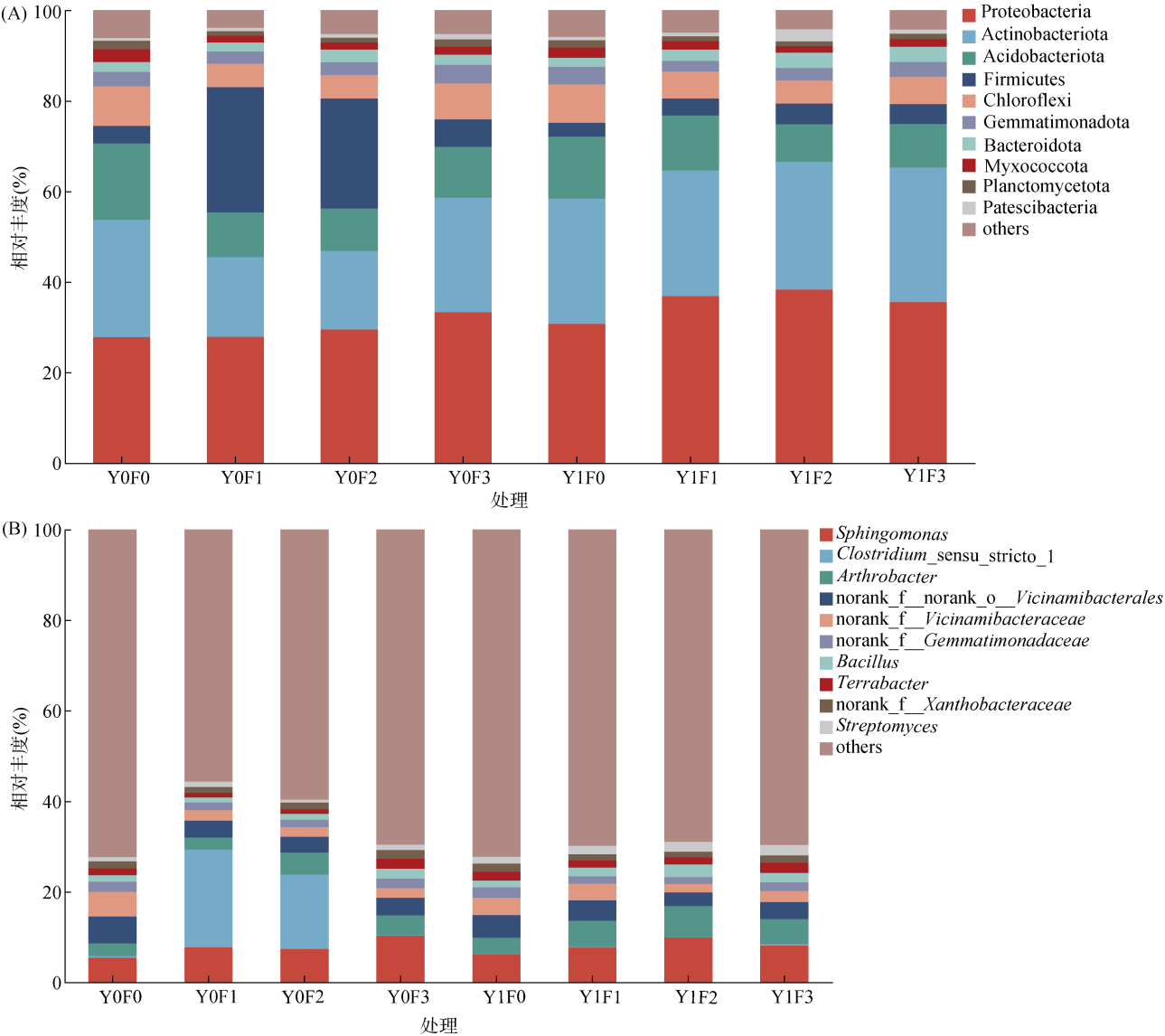


图 1 不同处理门水平(A)和属水平(B)细菌优势菌群

Fig. 1 Dominant bacterial communities at phylum (A) and genus (B) levels under different treatments

2.2.3 LEfSe 多级物种差异判别分析 LEfSe 通过线性判别分析(Linear discriminant analysis, LDA)评估物种对差异影响的贡献度,用于揭示可能在环境变

化中发挥关键作用的物种。图 2A 和图 2B 展示了 LDA 阈值大于 2 的物种单元及其差异性。门水平上(图 2B), Y1F0 处理迟杆菌门(Latescibacterota)、Y0F0 处理

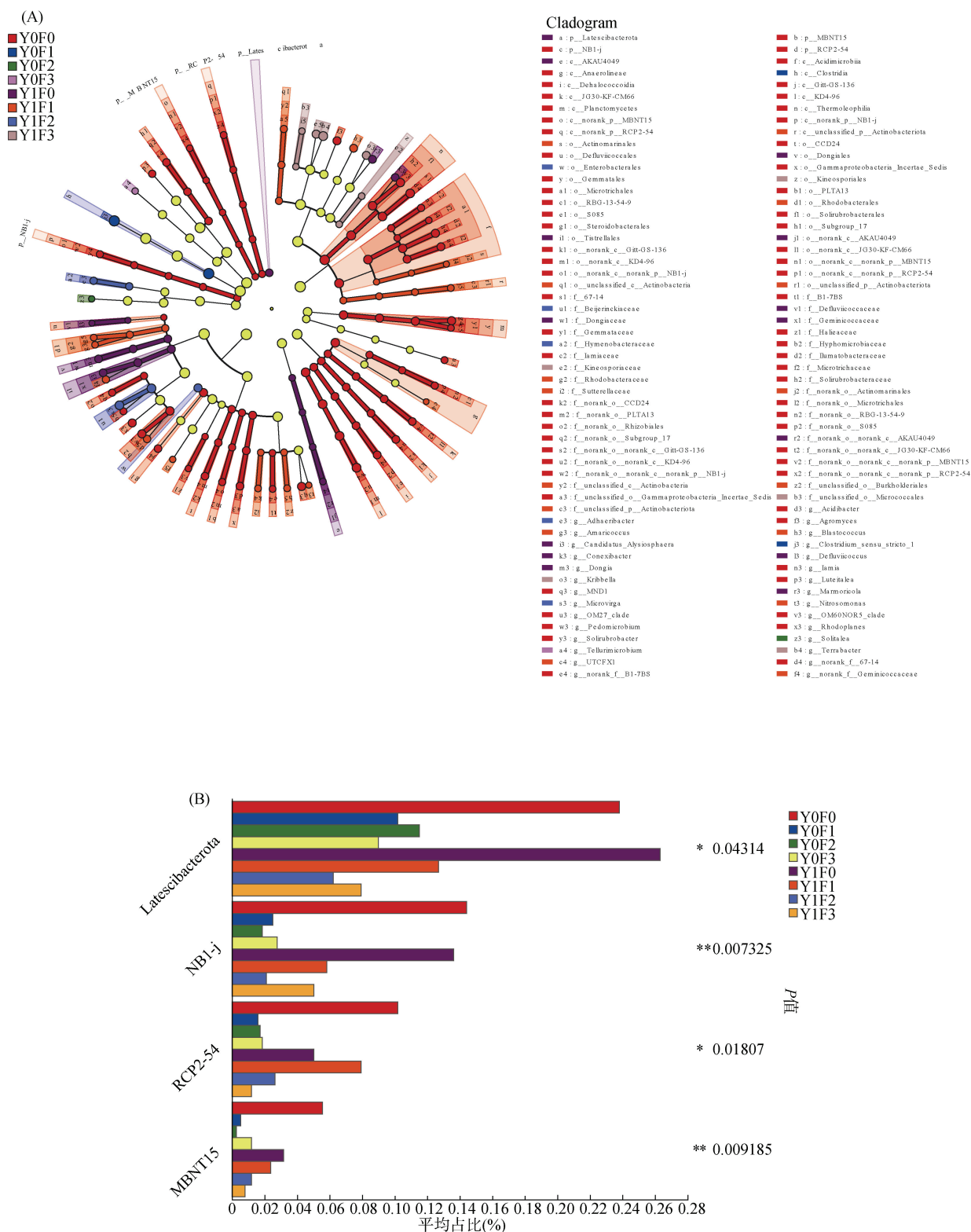


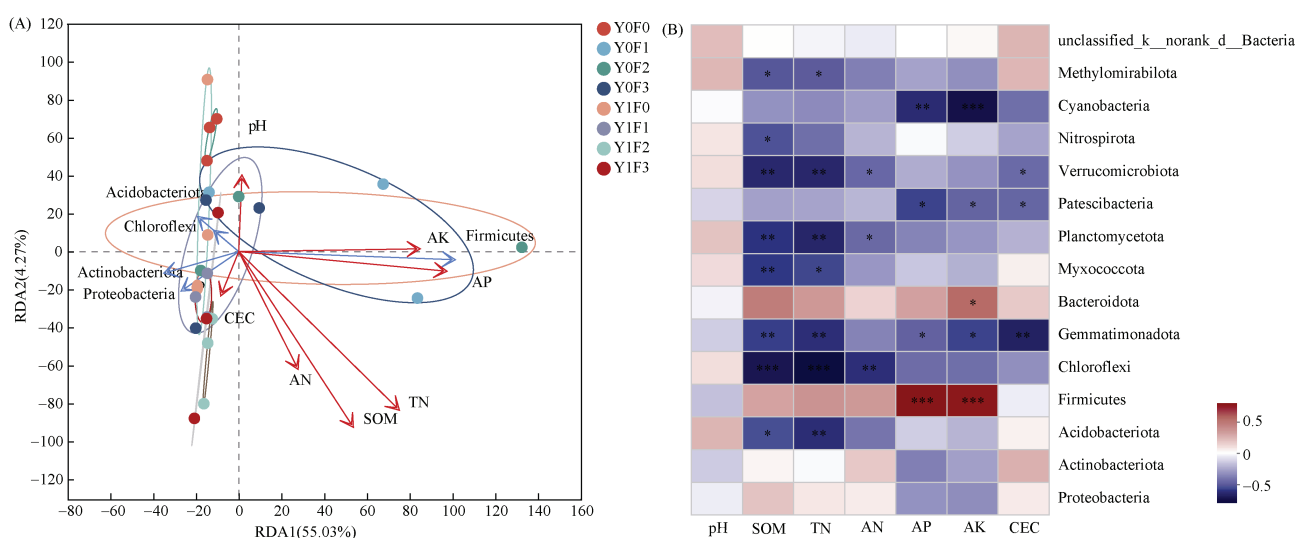
图 2 不同处理土壤细菌群落 LEfSe 线性判别分析(A)和 Kruskal-Wallis 秩和检验(B)

Fig. 2 LEfSe linear discriminant analysis(A) and Kruskal-Wallis rank sum test(B) of bacterial communities under different treatments

MBNT15 门的相对丰度显著高于其他处理; 纲水平上, Y1F0 处理 NB1-j 纲相对丰度极显著高于其他处理; 科水平上, Y0F0 处理 RCP2-54 科的相对丰度显著高于其他处理。

2.3 油菜秸秆还田下油枯配施腐熟剂土壤理化性质与细菌群落的相关性

门水平上(图 3A), 2 个排序轴(RDA1、RDA2)累计解释变异量达 59.3%, 说明排序轴能很好地反映烟株根际土壤理化性质与土壤细菌群落结构的关系。pH、速效钾(AK)含量与细菌群落相对丰度呈正相关关系, 有效磷(AP)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、有机质(SOM)及 CEC 值与细菌群落分布呈负相关关系, 其中 TN 和 SOM 是影响细菌群落分布的核心环境因子。



(图中 SOM、TN、AN、AP、AK、CEC 分别表示土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾和阳离子交换量; 蓝色箭头表示优势物种, 红色箭头表示数量型环境因子, 箭头长短表示对物种影响程度的大小; *, **, *** 分别表示相关性达 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 显著水平)

图 3 土壤理化性质与细菌群落的 RDA(A)和相关性热图(B)分析

Fig. 3 RDA(A) and correlation heat map(B) analysis of soil physicochemical properties and bacterial community

2.4 油菜秸秆还田下油枯配施腐熟剂对烟叶产量和品质的影响

由表 4 可知, Y1F0 处理烟叶产量较 Y0F0、Y1F1 处理显著提高, 增幅分别达 18.9% 和 24.5%, Y0F3、Y1F2 处理烟叶产量显著高于 Y1F1, 其余处理间差异不显著。Y0F3、Y1F0、Y1F2 处理烟叶产值显著高于 Y0F0、Y0F1、Y0F2 和 Y1F1。Y0F3 处理上等烟比例显著高于 Y0F0 处理, 提高了 17.6 个百分点, 其他处理上等烟比例较 Y0F0 处理提高了 3.3~15.2 个百分点, 但差异不显著。中等烟比例处理间无显著性差异, 以 Y0F0 最高。Y0F3 处理烟叶均价和级指均显著高于其他处理, 较 Y0F0 分别提高 5.2 元/kg 和 9.7 个百分点。相较于 Y0F0, 其余处理烟叶产指提高了 4.1%~

Spearman 相关性分析结果表明(图 3B), SOM、TN 含量与根际土壤细菌酸杆菌门、绿弯菌门、芽单胞菌门(Gemmatimonadota)、黏菌门(Myxococoota)、浮霉菌门(Planctomycetota)、疣微菌门(Verrucomicrobiota)、硝化螺旋菌门(Nitrospirota)及 Methyloirabilota 门相对丰度呈显著负相关; AP、AK 含量与厚壁菌门相对丰度呈显著正相关, 与芽单胞菌门、骸骨菌门(Patescibacteria)和蓝菌门(Cyanobacteria)相对丰度呈显著负相关; CEC 与芽单胞菌门、浮霉菌门和疣微菌门相对丰度呈显著负相关; AN 含量与绿弯菌门、浮霉菌门和疣微菌门相对丰度呈显著负相关; pH 对图 3B 中 15 种细菌优势菌群相对丰度的影响均未达到显著水平。

30.0%。综上, 油菜秸秆还田条件下, 油枯配施腐熟剂整体改善烟叶经济性状, 但规律不明显。

2.5 油菜秸秆还田下油枯配施腐熟剂对上部烟叶化学成分及其协调性的影响

由表 5 可知, 8 个处理 B₂F 等级烟叶总糖、烟碱、总氮、还原糖和氯含量均符合优质烟叶要求。与 Y0F0 相比, Y1F3 处理烟叶总糖、烟碱、还原糖和钾含量显著提高, Y1F2 处理显著提高了烟碱、总氮和钾含量, Y1F1 处理显著提高了烟碱和钾含量。各处理间氯含量差异均不显著。Y0F1 处理淀粉含量显著高于 Y0F2、Y0F3 处理, 与其他处理相比无显著性差异。糖碱比是评价烟叶化学成分协调性的关键指标, 其值在 8~10 之间表示化学成分协调性最佳。Y0F0 和

表 4 油枯配施腐熟剂对烟叶经济性状的影响
Table 4 Effects of rapeseed-cake combined with decomposing agent on economic characters of tobacco leaves

处理	产量(kg/hm ²)	产值(元/hm ²)	上等烟比例(%)	中等烟比例(%)	均价(元/kg)	级指(%)	产指
Y0F0	2 608.6±3.6bc	73 736.5±95.8c	50.9±5.9b	42.4±5.5a	28.3±0.9b	53.2±1.7b	92.4±1.8c
Y0F1	2 711.6±12.6bc	77 141.2±175.9bc	54.2±14.6ab	37.2±12.0a	28.6±2.8b	53.8±5.3b	96.7±3.3bc
Y0F2	2 773.2±16.6abc	76 775.4±157.6bc	54.5±6.1ab	31.8±6.7a	27.8±1.7b	52.3±3.2b	96.2±3.0bc
Y0F3	2 861.8±11.5ab	95 811.7±456.4a	68.5±2.6a	29.7±8.0a	33.5±0.5a	62.9±1.0a	120.1±8.0a
Y1F0	3 100.9±5.5a	94 021.0±176.0a	60.1±3.6ab	36.9±5.0a	30.3±0.3b	57.0±0.6b	117.8±3.3a
Y1F1	2 491.2±14.0c	75 072.0±548.0bc	61.5±3.4ab	32.1±2.2a	30.1±1.2b	56.6±2.3b	94.1±10.3bc
Y1F2	2 975.6±3.3ab	88 939.0±116.7a	56.9±2.5ab	37.0±4.4a	29.9±0.8b	56.2±1.5b	111.5±2.2a
Y1F3	2 795.1±15.0abc	85 350.5±618.6ab	66.1±10.5ab	38.4±14.2a	30.5±1.6b	57.3±2.9b	107.0±11.6ab

注：级指(%)=均价/中桔—(C₁F)价格×100；产指=亩产值/C₁F 价格。

表 5 油枯配施腐熟剂对烟叶化学成分及其协调性的影响
Table 5 Effects of rapeseed-cake combined with decomposing agent on chemical composition and coordination of tobacco leaves

处理	总糖(%)	烟碱(%)	总氮(%)	还原糖(%)	钾(%)
Y0F0	26.0±0.4b	2.2±0.1c	2.2±0.2bc	18.8±2.0b	2.0±0.0c
Y0F1	28.8±1.8ab	2.4±0.1c	2.1±0.0c	22.3±2.5ab	2.2±0.3bc
Y0F2	26.9±1.4ab	2.9±0.1b	2.4±0.2a	20.9±1.4ab	2.2±0.4bc
Y0F3	26.5±1.3b	3.0±0.3ab	2.3±0.0ab	21.0±1.5ab	2.0±0.2c
Y1F0	27.2±0.7b	3.1±0.1ab	2.3±0.0ab	20.5±1.3ab	2.3±0.1ab
Y1F1	28.4±1.4ab	3.1±0.1ab	2.3±0.1ab	19.5±0.9b	2.7±0.3a
Y1F2	28.9±1.6ab	3.3±0.3a	2.4±0.0a	18.8±1.9b	2.3±0.2ab
Y1F3	29.7±1.7a	3.2±0.2ab	2.3±0.0ab	23.3±1.0a	2.6±0.1ab

处理	氯(%)	淀粉(%)	糖碱比	氮碱比	钾氯比
Y0F0	0.4±0.1a	4.0±0.1ab	11.7±0.7a	1.0±0.0a	4.6±0.7a
Y0F1	0.6±0.1a	6.3±0.2a	11.8±0.2a	0.8±0.1bcd	3.9±0.3abc
Y0F2	0.6±0.1a	2.5±0.2c	9.4±0.8b	0.9±0.1ab	3.4±0.1bc
Y0F3	0.6±0.1a	3.0±0.6bc	9.0±0.8b	0.8±0.1bcd	3.2±0.5c
Y1F0	0.5±0.1a	3.4±0.3abc	8.7±0.5b	0.7±0.0cd	4.4±1.0abc
Y1F1	0.6±0.1a	3.8±0.9ab	9.2±0.1b	0.8±0.1bcd	4.3±0.3abc
Y1F2	0.6±0.1a	3.9±0.4ab	8.8±0.5b	0.8±0.0bcd	4.3±0.7abc
Y1F3	0.6±0.1a	3.6±0.2abc	9.3±0.4b	0.7±0.0cd	4.5±0.5ab

Y0F1 处理糖碱比大于 10，协调性稍差，而其余处理糖碱比介于 8.7~9.4，符合优质烟叶要求，表明其化学成分协调性较好。除 Y0F2 处理外，Y0F0 处理氮碱比值显著高于其他处理。钾氯比是反映烟叶燃烧性的重要指标，其中 Y0F2 和 Y0F3 处理钾氯比显著低于 Y0F0，Y1F1、Y1F2、Y1F3 处理与 Y0F0 相比无显著差异。综上所述，在油菜秸秆还田条件下，油枯配施腐熟剂促进烟叶糖类物质的积累，提高了烟碱、钾含量，改善了上部烟叶化学成分协调性。

3 讨论

3.1 油枯配施腐熟剂改善烤烟根际土壤理化性质
菜籽油枯富含多种营养元素和小分子有机营养

物质，具有良好的改土促生效应。另外，油菜秸秆还田不仅是土壤有机质的重要来源，且油菜秸秆富含钾素^[3]，在减施化学钾肥 15%~30% 时，土壤钾素盈余仍高于对照^[4]。本试验中，油枯配施腐熟剂有效提高了土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量及硝酸还原酶、脲酶和蔗糖酶的活性。这一结果与黄媛媛等^[24]的研究结论基本一致，其原因可能与油枯配施腐熟剂协同促进油菜秸秆腐解，释放出更多养分物质有关。因为秸秆促腐还田较秸秆常规还田有利于黑土地土壤养分含量提高^[25]。另外，CEC 常用于表征土壤肥力的高低，油枯配施腐熟剂根际土 CEC 提高了 3.9%~16.5%，以腐熟剂施用量 45 kg/hm² 时 CEC 最高。说明油菜秸秆还田条件下，油枯配施腐熟剂可有效改善烟株根际土壤理化性状，能够提升与氮、碳循

环相关的酶活性(如硝酸还原酶、脲酶和蔗糖酶),从而加速油枯及还田油菜秸秆的腐熟及养分释放进程,进而提高土壤肥力。

3.2 油枯配施腐熟剂提高土壤细菌多样性, 改变群落结构

与 Y0F0 相比,油枯配施腐熟剂提高根际土壤细菌群落多样性和丰富度。Shannon 指数常用于反映土壤微生物群落多样性的高低。结合文献[26]关于土壤理化性质与微生物群落互作机制的研究,本试验证实油枯与腐熟剂配施通过改善土壤 pH(提升 0.2~0.9 个单位),提高有机质含量(增幅 4.6%~13.7%),有效重构了细菌群落结构,促进根际微生态系统稳定。一般认为,土壤细菌群落是一个相对稳定的系统,施肥很可能只是影响某些种群丰度的增减^[27]。该研究中,油枯配施腐熟剂提高了变形菌门及鞘氨醇单胞菌属相对丰度,降低了酸杆菌门相对丰度,另外,油枯腐熟剂同时施用提高放线菌门相对丰度及其节杆菌属相对丰度。LEfSe 分析也进一步证明油枯配施腐熟剂改变细菌群落组成及相对丰度,其成因可能与菜籽油枯为腐熟剂菌种提供充足的氮、碳源,促进优势菌群快速增殖,进而加速油菜秸秆分解和养分释放有关,这与文中全氮和有机质含量是影响细菌群落分布的核心环境因子的结论相吻合。这一发现与于宗波等^[28]关于木质素降解酶活性提升的研究,以及萨如拉等^[29]报道的纤维素分解菌丰度增加规律基本一致。本研究进一步揭示外源有机物料改良土壤可能通过引起特定菌群丰度波动,建立新的代谢网络以驱动微生物功能的重构,进而达到改良土壤的作用。

3.3 油枯配施腐熟剂改善上部烟叶品质, 提高化学成分协调性

本研究证实,油枯与腐熟剂协同作用改善烟叶经济性状和内在品质。相较于 Y0F0,油枯配施腐熟剂通过双重调控土壤-植株系统,使烟叶经济性状及关键化学成分得到优化,其中产量和产值达到了优质适产,而化学成分均处于优质烟叶要求阈值内^[30]。这种产质量的提升效应可能源于两方面的协同作用,一是油枯的高氮含量与腐熟剂菌种的协同增效,促进土壤及植株氮素同化效率^[31];二是腐熟剂介导促进油菜秸秆和油枯腐解进程,释放的活性物质提升了根系对养分的吸收能力,进而促进光合产物积累。值得注意的是,本研究与陈治锋等^[32]关于上部烟叶烟碱含量变化的结论存在差异。本试验中烟碱的适度积累可能归因于油枯养分缓释特性与腐熟剂菌群代谢需求高度匹配,使氮素矿化速率提高,既保障了烤烟生育

后期氮素的持续供应,又避免前期氮素过量导致生长过旺,改善了上部烟叶化学成分协调性及燃烧性,这为破解上部烟叶工业可用性低的难题提供了新的解决方案。上述结论印证了有机-生物协同改良体系在特色优质烟叶开发中的独特价值,其作用机制涉及土壤微生物结构、功能的重构以及碳氮代谢物网络优化等多维调控过程。

4 结论

1) 油枯配施腐熟剂促进土壤养分-酶活性协同增效作用,相较于其他处理,油枯 450 kg/hm²+腐熟剂 45 kg/hm²配施处理使根际土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量增加,同步激活土壤酶系统(硝酸还原酶、脲酶、蔗糖酶活性提高),有利于加速油菜秸秆腐解进程,进而改善土壤理化性状。

2) 油枯配施腐熟剂提高烟株根际土壤细菌群落多样性及相对丰度,促进根际土壤细菌群落重构,变形菌门和放线菌门为绝对优势菌门,鞘氨醇单胞菌属有益菌属为绝对优势菌群。

3) 油枯配施腐熟剂改善烟叶经济性状和上部烟叶化学成分及协调性,提高上部烟叶工业可用性。

综合来看,在油菜秸秆还田下,油枯 450 kg/hm²+腐熟剂 45 kg/hm²配施模式适合罗平烟区油菜-烤烟闭环栽培模式下的改土及烟叶提质要求。

参考文献:

- [1] 燕林祥, 庞绍明, 王波, 等. 云南省罗平县油菜种业现状、存在问题及对策[J]. 中国种业, 2022(1): 38-41.
- [2] 陈华, 付利波, 赵凯琴, 等. 油烟轮作区不同土壤类型油菜对氮钾养分利用效率研究[J]. 西南农业学报, 2020, 33(9): 1911-1916.
- [3] 唐保国, 陶诗顺, 张荣萍, 等. 油菜秸秆全量还田减钾栽培对杂交稻分蘖及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(3): 29-33.
- [4] 赵文军, 薛开政, 尹梅, 等. 油菜-烤烟轮作体系中油菜秸秆还田方式及钾肥减量对烤烟钾素利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 675-681.
- [5] 李继福, 薛欣欣, 李小坤, 等. 水稻-油菜轮作模式下秸秆还田替代钾肥的效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 317-325.
- [6] 敖金成, 罗华元, 张晓龙, 等. 玉米秸秆还田方式对初烤烟叶品质及土壤肥力的影响[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(8): 1456-1461.
- [7] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 等. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 297-302.
- [8] 韦建玉, 王政, 徐天养, 等. 秸秆覆盖与揭膜互作对坡耕地烟田土壤细菌群落及烟叶品质的影响[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 82-89.

- [9] 武雪萍, 钟秀明, 刘增俊. 饼肥在植烟土壤中的矿化速率和腐殖化系数分析[J]. 中国土壤与肥料, 2007(5): 32-35.
- [10] 李亮, 张佩佳, 张翔, 等. 不同饼肥配比对烟田土壤生物学特性及氮素转化的影响[J]. 土壤, 2019, 51(4): 648-657.
- [11] 张红, 曹莹非, 徐温新, 等. 植物秸秆腐解特性与微生物群落变化的响应[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1482-1492.
- [12] Bhatia S K, Jagtap S, Bedekap, et al. Recent developments in pretreatment technologies on lignocellulosic biomass: Effect of key parameters, technological improvements, and challenges[J]. Bioresource Technology, 2019(300): 122724.
- [13] 王政, 徐天养, 刘久羽, 等. 云南红壤坡耕地秸秆配施复合菌剂的应用效应研究[J]. 作物杂志, 2023(1): 89-95.
- [14] 程培军, 郝浩浩, 李翔, 等. 施用饼肥和微生物菌剂对烤烟产质量及土壤微生物特性的影响[J]. 河南农业科学, 2024, 53(9): 57-65.
- [15] 于蓉. 典型油菜花旅游节生态资源比较优势研究[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(3): 208-211.
- [16] 余小芬, 杨树明, 邹炳礼, 等. 菜籽油枯有机无机复混肥对烤烟产质量及养分利用率的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1564-1574.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 水溶性糖的测定 连续流动法: YC/T 159—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [19] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 总植物碱的测定 连续流动法: YC/T 160—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [20] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 总氮的测定连续流动法: YC/T 161—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [21] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 钾的测定 火焰光度法: YC/T 173—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [22] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 氯的测定 连续流动法: YC/T 162—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [23] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 淀粉的测定 连续流动法: YC/T 216—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [24] 黄媛媛, 黄亚丽, 王艳群, 等. 秸秆腐熟剂用量对土壤性质及小麦产量的影响[J]. 河北农业大学学报, 2023, 46(6): 10-16.
- [25] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 915-921.
- [26] 敖金成, 李博, 阎凯, 等. 连作对云南典型烟区植烟土壤细菌群落多样性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 46-54.
- [27] 马龙, 高伟, 栾好安, 等. 有机肥/秸秆替代化肥模式对设施菜田土壤氮循环功能基因丰度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(10): 1767-1778.
- [28] 于宗波, 杨恒山, 萨如拉, 等. 不同质地土壤玉米秸秆还田配施腐熟剂效应的研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 234-240.
- [29] 萨如拉, 杨恒山, 乔宝玲. 秸秆腐熟剂对土壤化学性状及土壤呼吸量的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2020, 35(3): 233-237.
- [30] 李健铭, 刘青丽, 李志宏, 等. 不同有机肥料对烤烟氮素吸收和产值的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(9): 83-88.
- [31] 吴殿信, 袁志永, 闫克玉, 等. 烤烟各等级烟叶质量指数的确定[J]. 烟草科技, 2001, 34(12): 9-15.
- [32] 陈治锋, 刘伟, 肖汉乾, 等. 稻草秸秆配施腐熟剂对烤烟生长及产质量的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(S1): 292-299.

(责任编辑: 毛小芳)