

徐亚绅,尹振华,肖旭,等. 有机氮等量替代无机氮对广元烟区植烟土壤微生物群落和烤烟品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(8):1526-1537.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.08.009

有机氮等量替代无机氮对广元烟区植烟土壤微生物群落和烤烟品质的影响

徐亚绅¹, 尹振华², 肖旭², 胡继涛², 王小东¹, 王栋²

(1.河南科技大学农学院/河南省旱地农业工程技术研究中心,河南 洛阳 471023; 2.四川省烟草公司广元市公司,四川 广元 628100)

摘要: 为探究有机氮等量替代无机氮对广元烟区烟草生长和土壤环境的影响,本研究以云烟 87 为试验材料开展田间试验,共设置 5 个处理,分别为 100%无机氮对照(CK)、15%有机氮等量替代无机氮处理(T1)、30%有机氮等量替代无机氮处理(T2)、45%有机氮等量替代无机氮处理(T3)、60%有机氮等量替代无机氮处理(T4)。所用有机氮肥为腐熟油枯(油菜籽饼),各处理总氮肥(纯氮)施用量均为 97.5 kg/hm²。研究表明,有机氮等量部分替代无机氮能够有效改善土壤环境。其中 T2 处理土壤全氮含量、速效磷含量、速效钾含量、有机质含量和碱解氮含量,以及土壤蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、多酚氧化酶活性、碱性磷酸酶活性、中性磷酸酶活性均显著高于 CK ($P<0.05$)。同时 T2 处理优化了土壤微生物群落结构,使赤霉菌属(*Gibberella*)真菌相对丰度增加,镰刀菌属(*Fusarium*)真菌相对丰度降低。从生产来看,T2 处理提高了烤烟产值、中上等烟比例,其感官评价得分最高。因此 30%有机氮等量替代无机氮是广元烟区最适宜的施肥方式,具有重要的推广应用价值。

关键词: 烟草; 有机氮; 无机氮; 土壤微生物; 酶活性; 烤烟品质

中图分类号: S572 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)08-1526-12

Effects of equal-nitrogen replacement of inorganic nitrogen with organic nitrogen on soil microbial communities and flue-cured tobacco quality in Guangyuan tobacco-growing area

XU Yashen¹, YIN Zhenhua², XIAO Xu², HU Jitao², WANG Xiaodong¹, WANG Dong²

(1.College of Agriculture, Henan University of Science and Technology/Henan Dryland Agricultural Engineering Technology Research Center, Luoyang 471023, China; 2.Guangyuan City Branch of Sichuan Tobacco Company, Guangyuan 628100, China)

Abstract: To investigate the effects of replacing inorganic nitrogen with an equivalent amount of organic nitrogen on tobacco growth and soil environment in the Guangyuan tobacco-growing area, a field experiment was conducted using Yunyan 87 as the test material. Five treatments were set up, namely: 100% inorganic nitrogen (CK), 15% organic nitrogen replacing inorganic nitrogen at an equal nitrogen rate (T1), 30% organic nitrogen replacing inorganic nitrogen at an equal nitrogen rate (T2), 45%

收稿日期:2025-02-22

基金项目:中国烟草总公司四川省公司科技计划项目(SCYC202211)

作者简介:徐亚绅(1999-),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为烟草栽培与耕作。(E-mail)xuyashen1999090866@163.com

通讯作者:王小东,(E-mail)wxd@haust.edu.cn;王栋,(E-mail)wangdong12032024@163.com

organic nitrogen replacing inorganic nitrogen at an equal nitrogen rate (T3), and 60% organic nitrogen replacing inorganic nitrogen at an equal nitrogen rate (T4). The organic nitrogen fertilizer used was decomposed rapeseed cake, and the total nitrogen application rate in each treatment was 97.5 kg/hm². The results showed that partial replacement of inorganic nitrogen with an equivalent amount of organic nitro-

gen could effectively improve the soil environment. Among them, the contents of soil total nitrogen, available phosphorus, available potassium, organic matter, and alkali-hydrolyzable nitrogen, as well as the activities of sucrase, urease, catalase, polyphenol oxidase, alkaline phosphatase, and neutral phosphatase in the T2 treatment were significantly higher than those in CK ($P < 0.05$). Meanwhile, the T2 treatment optimized the soil microbial community structure, increasing the relative abundance of *Gibberella* and decreasing the relative abundance of *Fusarium*. In terms of production, the T2 treatment increased the output value of flue-cured tobacco and the proportion of medium and high-grade tobacco, and obtained the highest sensory evaluation score. Therefore, replacing 30% of inorganic nitrogen with organic nitrogen at an equal nitrogen rate is the most suitable fertilization method for the Guangyuan tobacco-growing area and has significant value for widespread application.

Key words: tobacco; organic nitrogen; inorganic nitrogen; soil microorganisms; enzyme activity; flue-cured tobacco quality

优质烤烟的生产依赖于良好的土壤环境。广元市位于四川省东北部,土壤类型为紫色钙质土。由于该地区烟农过度施用化肥导致土壤中养分含量下降、酸化加剧、病虫害频发、微生物群落结构失衡^[1-2],进而影响烤烟品质,表现为烟叶油分不足、品质下降。

张昕^[3]通过 8.5 年的菜田试验,系统研究了有机-无机氮肥配施对蔬菜产量和土壤肥力的影响。曾希柏^[4]发现 60% 有机氮与 40% 无机氮配施可显著提升稻田土壤中养分含量和水稻产量。大量研究结果表明,与单施化肥相比,有机无机肥配施能显著改善土壤理化性质、提高酶活性、促进养分释放^[5-7]。在烟草种植方面,适宜的有机无机氮肥配比可优化土壤微生物群落、增强烟株抗病性、提升烟叶品质 and 经济效益^[8-12]。

有机氮替代比例对烟草生长和品质的影响呈现明显的区域差异性。在山东省临沂地区,25% 饼肥与 75% 化肥配施可显著降低烟叶杂气物质含量,使有机酸含量适中,从而提升香气品质^[13]。在云南地区,菜粕堆肥与无机肥以 20 : 80 (纯氮比例) 配施,可同时提高烤烟产量和品质^[14]。在重庆黄壤烟田,采用有机肥提供 30% 氮结合化肥提供 70% 氮的施肥措施,可显著改善基础地力,同时提高烟叶的产量和品质^[15]。在黔东南烟草种植区,有机氮适宜比例为 36.00% ~ 45.77%^[16]。河南省沙壤土地区,50% 有机氮替代化学氮肥能有效改善土壤生物学特性,提升烟叶品质^[17]。在广西河池,化学氮肥配施 50% 有机氮肥,烟草的增产提质效果最佳^[18]。

油枯(油菜籽饼)是一种富含有机质和氨基酸的有机氮肥,充分腐熟发酵后,不仅能够提供植物必须的营养,还可以有效改善土壤微生物结构和多样性^[19-20]。因此,本研究拟选用油枯作为有机肥,采用

梯度设计法,设置 5 个有机氮替代水平,在控制总氮量的前提下,全面评估不同配比对土壤理化性质、生物学特性及烟叶品质的影响,旨在建立适合广元烟区生态特点的有机无机氮肥优化配施技术体系,为该地区优质烟叶的可持续生产提供理论支撑和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2024 年在四川省广元市剑阁县普安镇江东村(北纬 31° 62', 东经 105° 41') 进行。该区域属北温带季风气候,海拔 550 ~ 820 m。供试田块地势平坦,灌溉条件良好,前茬作物为玉米。土壤为紫色钙质土,肥力中等,pH 值 6.5,有机质含量 13.20 g/kg,全氮含量 0.75 g/kg,碱解氮含量 102.00 mg/kg,有效磷含量 13.80 mg/kg,速效钾含量 268.90 mg/kg。供试烤烟品种为云烟 87,施用肥料包括烟草专用复合肥(N 含量 : P₂O₅ 含量 : K₂O 含量 = 10 : 15 : 25)、烟草专用追肥(N 含量 : P₂O₅ 含量 : K₂O 含量 = 4 : 8 : 30)、腐熟油枯(N 含量 : P₂O₅ 含量 : K₂O 含量 = 2 : 2 : 2)、硫酸钾(50% K₂O)和过磷酸钙(12% P₂O₅)。

1.2 试验设计

采用完全随机区组设计,设置 5 个处理,分别为 100% 无机氮对照(CK)、15% 有机氮等量替代无机氮处理(T1)、30% 有机氮等量替代无机氮处理(T2)、45% 有机氮等量替代无机氮处理(T3)、60% 有机氮等量替代无机氮处理(T4),所用有机氮肥为腐熟油枯,各处理总氮肥(纯氮)施用量均为 97.5 kg/hm²。氮磷钾肥配施比例为 N 含量 : P₂O₅ 含量 : K₂O 含量 = 1.0 : 1.3 : 3.0,磷钾不足部分通过过磷酸钙和硫酸钾补充。种植密度为 1 hm² 18 450 株,株行距 120 cm × 45 cm,留叶数 22 片。基肥条施,

有机氮肥穴施,其他管理按当地烤烟生产规范执行。

1.3 样品采集

移栽后 75 d,采用五点取样法采集根际土壤。土壤样品分为两份:一份土壤样品用于微生物群落高通量测序;另一份土壤样品风干、研磨和过筛后用于土壤理化性质和土壤酶活性的测定。烟叶成熟期,取 C3F 等级烟叶[烤叶分级标准见《烤烟》(GB 2635-1992)]1 kg,用于感官评价。

1.4 试验方法

1.4.1 土壤理化性质与酶活测定 依照鲍士旦^[21]的方法测定土壤有机质含量、全氮含量、碱解氮含量、速效磷含量和速效钾含量。参照关松荫^[22]的方法测定土壤脲酶活性、过氧化氢酶活性、蔗糖酶活性、多酚氧化酶活性、碱性磷酸酶活性和中性磷酸酶活性。

1.4.2 微生物群落总基因组测序 利用土壤 DNA 基因组提取试剂盒(货号 D6382-01, Omega Bio-tek 公司产品)提取土壤微生物群落总基因组 DNA,使用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测基因组 DNA 质量,利用紫外可见分光光度计(型号 NanoDrop2000, Thermo Scientific 公司产品)测定 DNA 浓度和纯度。以提取的 DNA 为模板,使用携带 Barcode 序列的上游引物 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和下游引物 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 扩增 16S rRNA 基因 V3-V4 可变区。PCR 反应体系:5×TransStart FastPfu 缓冲液 4.0 μL, 2.5 mmol/L dNTPs 2.0 μL, 上游引物 (5 μmol/L) 0.8 μL, 下游引物 (5 μmol/L) 0.8 μL, TransStart FastPfu DNA 聚合酶 0.4 μL, DNA 模板 10 ng, ddH₂O 补足至 20.0 μL。扩增的程序:95 °C 预变性 3 min; 95 °C 变性 30 s, 55 °C 退火

30 s, 72 °C 延伸 30 s, 27 个循环; 72 °C 延伸 10 min。PCR 产物经 2% 琼脂糖凝胶电泳检测, 纯化后, 于 Illumina NovaSeq 平台进行测序^[23]。

1.4.3 烤烟感官评价和烟草经济性状调查 将每个处理采集好后的 C3F 等级的烟叶, 平衡水分后切丝卷制。根据《烟草在制品感官评价方法》(YC/T 415-2011)^[24], 组织四川中烟工业有限责任公司烟草专家对烤后烟叶进行感官评价。根据吴文信等^[25]的方法调查烟草经济性状。

1.5 数据处理

利用软件 Trimmomatic 对原始数据进行质量控制, 利用软件 QIIME2 以 97% 相似度阈值进行操作分类单元 (OTU) 聚类, 基于 Silva 数据库进行物种注释。利用软件 mothur 计算 Sobs 指数、Shannon 指数、Ace 指数、Chao1 指数 (α 多样性)、Bray-Curtis 距离 (β 多样性)。结合冗余分析 (db-RDA) 和 Spearman 相关性分析解析环境因子对土壤微生物群落结构的关联性, $|r| > 0.6$ 且 $P < 0.05$ 判定显著相关。利用 SPSS 27.0 进行单因素方差分析 (Duncan's 检验)。利用 Origin 2022、R 软件 (Version 1.6.2)、Majorbio 云平台 (<https://www.majorbio.com>) 制作图表。

2 结果与分析

2.1 有机氮等量替代无机氮处理对植烟土壤理化性质的影响

如表 1 所示, T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理植烟土壤全氮含量、速效磷含量、速效钾含量和有机质含量均显著高于 CK ($P < 0.05$), T2 处理、T3 处理、T4 处理土壤碱解氮含量显著高于 CK ($P < 0.05$)。

表 1 不同处理植烟土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of tobacco-growing soils under different treatments

处理	全氮含量 (mg/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	有机质含量 (g/kg)
CK	0.121 1±0.007c	43.78±2.55c	10.88±0.15c	42.60±2.11c	24.08±0.86b
T1	0.149 9±0.002b	47.33±1.51bc	13.38±0.44ab	52.78±2.19ab	29.60±0.31a
T2	0.160 0±0.001ab	57.27±0.86a	14.06±0.25a	53.83±3.19ab	31.13±0.49a
T3	0.161 3±0.004a	52.12±1.97ab	13.40±0.40ab	50.40±4.19b	30.76±0.62a
T4	0.161 6±0.001a	53.24±2.72ab	12.37±0.60b	57.16±5.19a	30.34±0.06a

CK: 100% 无机氮对照; T1: 15% 有机氮等量替代无机氮; T2: 30% 有机氮等量替代无机氮; T3: 45% 有机氮等量替代无机氮; T4: 60% 有机氮等量替代无机氮。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

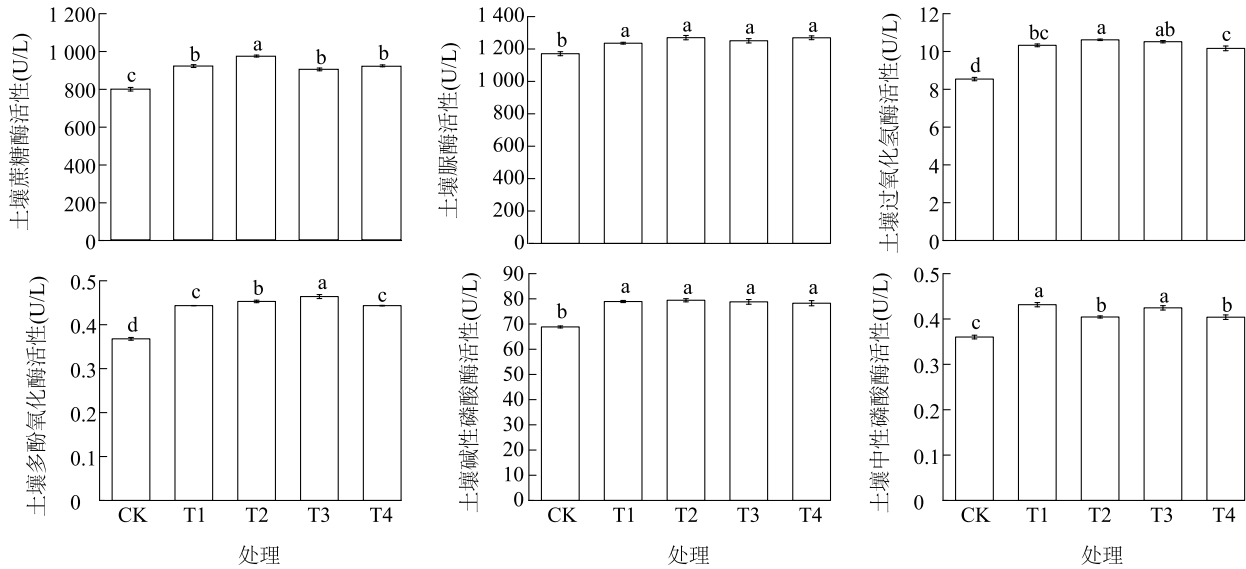
2.2 有机氮等量替代无机氮处理对植烟土壤酶活性的影响

如图 1 所示, T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处

理植烟土壤蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、多酚氧化酶活性、碱性磷酸酶活性、中性磷酸酶活性均显著高于 CK ($P < 0.05$)。T2 处理植烟土壤

蔗糖酶活性显著高于 CK、T1 处理、T3 处理和 T4 处理 ($P<0.05$)。T2 处理植烟土壤过氧化氢酶活性显著高于 CK、T1 处理、T4 处理 ($P<0.05$)。T3 处理植烟土壤多酚氧化酶活性显著高于 CK、T1 处理、T2

处理和 T4 处理 ($P<0.05$)。T1 处理、T3 处理植烟土壤中性磷酸酶活性显著高于 CK、T2 处理和 T4 处理 ($P<0.05$)。



CK:100%无机氮对照;T1:15%有机氮等量替代无机氮;T2:30%有机氮等量替代无机氮;T3 处理:45%有机氮等量替代无机氮;T4:60%有机氮等量替代无机氮。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图1 不同处理植烟土壤酶活性

Fig.1 Enzyme activities in tobacco-growing soils under different treatments

2.3 有机氮等量替代无机氮处理对植烟土壤微生物群落多样性的影响

2.3.1 有机氮等量替代无机氮处理对植烟土壤微生物群落 α 多样性的影响 如表2所示,CK、T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理植烟土壤细菌群落 Sobs 指数、Simpson 指数、Ace 指数、Chao1 指数均无显著差异 ($P>$

0.05)。T2 处理、T3 处理、T4 处理植烟土壤细菌群落 Shannon 指数显著高于 CK、T1 处理 ($P<0.05$)。T3 处理土壤真菌 Sobs 指数、Ace 指数显著高于 CK ($P<0.05$)。T2 处理 Shannon 指数、Chao1 指数显著高于 CK ($P<0.05$)。CK、T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理植烟土壤真菌群落 Simpson 指数无显著差异 ($P>0.05$)。

表2 不同处理植烟土壤微生物群落 α 多样性

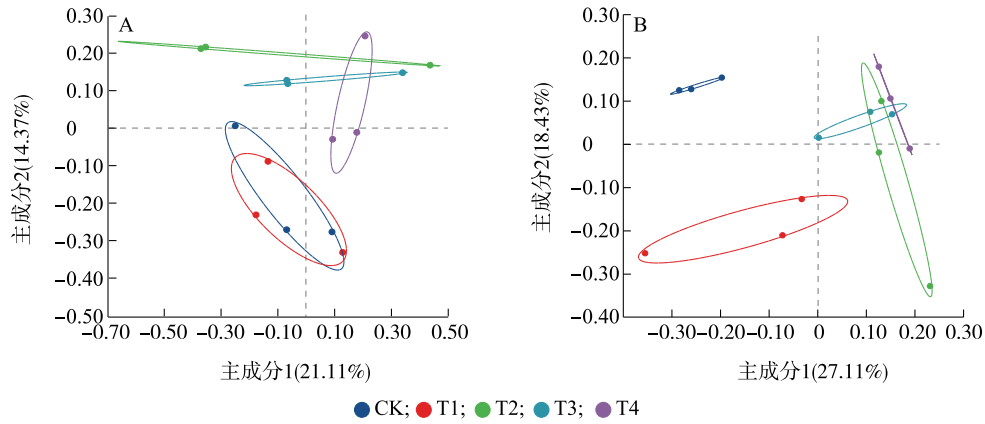
Table 2 The α -diversity of microbial communities in tobacco-growing soils under different treatments

类别	处理	Sobs 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Ace 指数	Chao1 指数
细菌	CK	1 458.67±105.26a	6.04±0.09b	0.003 8±0.000 2a	1 437.46±119.78a	1 466.06±108.88a
	T1	1 508.00±382.70a	6.06±0.08b	0.004 4±0.001 5a	1 661.66±347.99a	1 524.86±394.02a
	T2	1 957.00±166.90a	6.60±0.18a	0.006 5±0.002 0a	1 943.86±93.91a	1 902.76±89.57a
	T3	1 865.00±82.25a	6.53±0.08a	0.004 7±0.001 1a	2 087.35±248.14a	2 067.07±251.22a
	T4	1 591.00±217.50a	6.41±0.19ab	0.006 1±0.001 0a	1 676.68±199.91a	1 611.27±217.63a
真菌	CK	363.00±51.26b	3.12±0.20b	0.05±0.002 0a	366.26±53.43b	364.26±52.20b
	T1	409.33±36.43ab	3.48±0.23ab	0.07±0.024 0a	414.53±37.52b	411.83±37.15b
	T2	463.67±11.79ab	3.95±0.04a	0.15±0.063 0a	466.96±12.37ab	552.64±35.65a
	T3	524.67±35.17a	3.62±0.24ab	0.08±0.002 0a	553.64±38.04a	465.30±12.22ab
	T4	454.00±31.56ab	3.80±0.19ab	0.11±0.027 0a	456.37±33.20ab	455.36±32.57ab

CK:100%无机氮对照;T1:15%有机氮等量替代无机氮;T2:30%有机氮等量替代无机氮;T3 处理:45%有机氮等量替代无机氮;T4:60%有机氮等量替代无机氮。相同微生物类别同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.3.2 有机氮等量替代无机氮处理对对植烟土壤微生物群落β多样性的影响 图 2A 显示,CK 和 T1 处理聚集在一起,表明二者细菌群落结构相似性较高。而 T2 处理、T3 处理和 T4 处理部分重合,表明细菌群

落结构存在一定相似性。图 2B 显示,CK 和 T1 处理各自独立聚集,T2 处理、T3 处理和 T4 处理部分重合,表明真菌群落结构存在一定相似性。综上,有机氮替代处理可以改变真菌的菌群结构。



CK:100%无机氮对照;T1:15%有机氮等量替代无机氮;T2:30%有机氮等量替代无机氮;T3 处理:45%有机氮等量替代无机氮;T4:60%有机氮等量替代无机氮。

图 2 不同处理植烟土壤细菌(A)和真菌(B)群落的主坐标分析

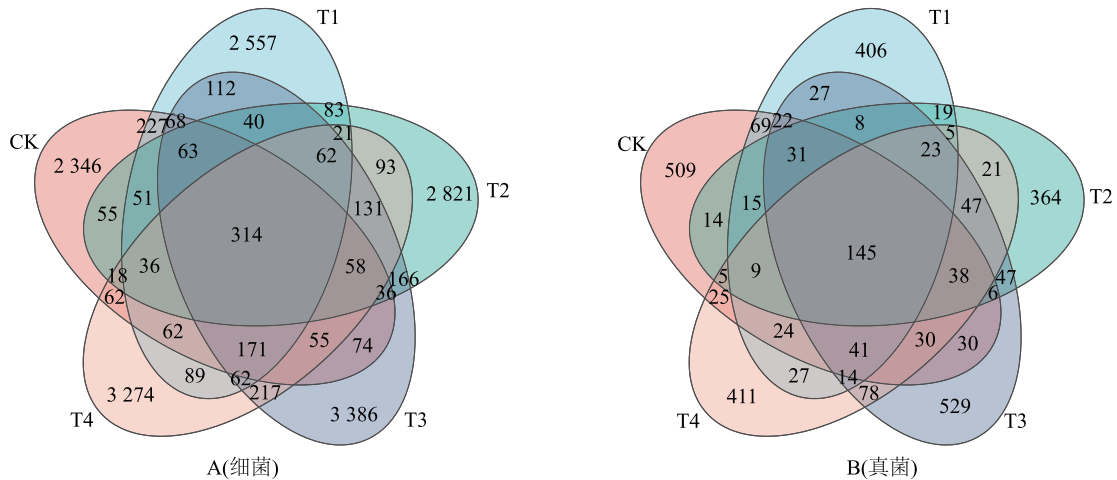
Fig.2 Principal coordinate analysis of bacterial (A) and fungal (B) communities in tobacco-growing soils under different treatments

2.4 有机氮等量替代无机氮处理对植烟土壤微生物群落组成的影响

2.4.1 有机氮等量替代无机氮处理对植烟土壤微生物群落组成的影响 植烟土壤细菌中,共检测到16 810个扩增子序列变体(ASV),分别归类到 885 个属,431 个科,269 个目,117 个纲,37 个门。如图 3A 可知,检测到的 ASV 中,T3 处理和 T4 处理植烟土壤细菌的 ASV 总数最高,其次是 T2 处理。CK、T1、T2、T3、T4 处理植烟

土壤细菌特有的 ASV 数目分别为2 346、2 557、2 821、3 386、3 274个,所有处理共有的 ASV 数为 314 个。

植烟土壤真菌中,共检测到3 039个扩增子序列变体(ASV),分别归类到 475 个属,235 个科,101 个目,42 个纲,12 个门。如图 3B 可知,T3 处理植烟土壤真菌 ASV 数量最高。CK、T1、T2、T3 和 T4 处理特有的 ASV 数目分别为 509、406、364、529、411 个,所有处理共有的 ASV 数为 145 个。



CK:100%无机氮对照;T1:15%有机氮等量替代无机氮;T2:30%有机氮等量替代无机氮;T3 处理:45%有机氮等量替代无机氮;T4:60%有机氮等量替代无机氮。

图 3 植烟土壤微生物群落组成

Fig.3 Composition of microbial communities in tobacco-growing soils

2.4.2 有机氮等量替代无机氮处理对门水平上植烟土壤微生物群落组成的影响 如图4所示,植烟土壤细菌群落门水平上,变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)、酸杆菌门(Acidobacteriota)、绿弯菌门(Chloroflexi)和厚壁菌门(Firmicutes)细菌的相对丰度较高。CK、T1处理、T2处理、T3处理和T4处理变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)、酸杆菌门(Acidobacteriota)、绿弯菌门(Chloroflexi)和厚壁菌门细菌的平均相对丰度分别为38.42%、17.99%、15.16%、8.21%和4.24%,总相对丰度达到84.02%。

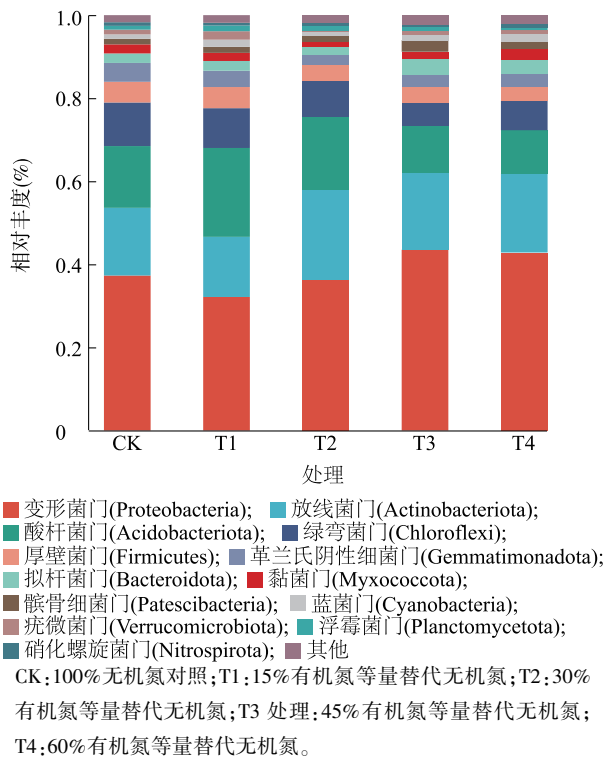


图4 不同处理细菌门水平上植烟土壤微生物群落的相对丰度
Fig.4 Relative abundance of microbial communities at the bacterial phylum level in tobacco-growing soils under different treatments

如图5所示,植烟土壤真菌群落门水平上,子囊菌门(Ascomycota)、被孢霉菌门(Mortierellomycota)和担子菌门(Basidiomycota)真菌的相对丰度较高。CK、T1处理、T2处理、T3处理和T4处理子囊菌门(Ascomycota)、被孢霉菌门(Mortierellomycota)和担子菌门(Basidiomycota)真菌的平均相对丰度分别为61.84%、18.29%和11.48%,总相对丰度达到91.61%。

2.4.3 有机氮等量替代无机氮处理对属水平上植烟土壤微生物群落组成的影响 如图6A所示,植

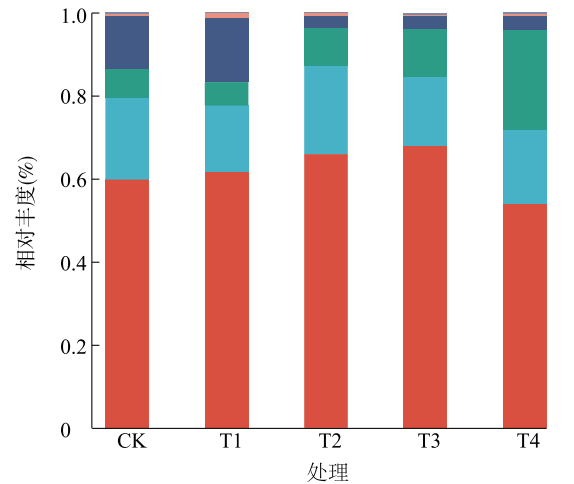
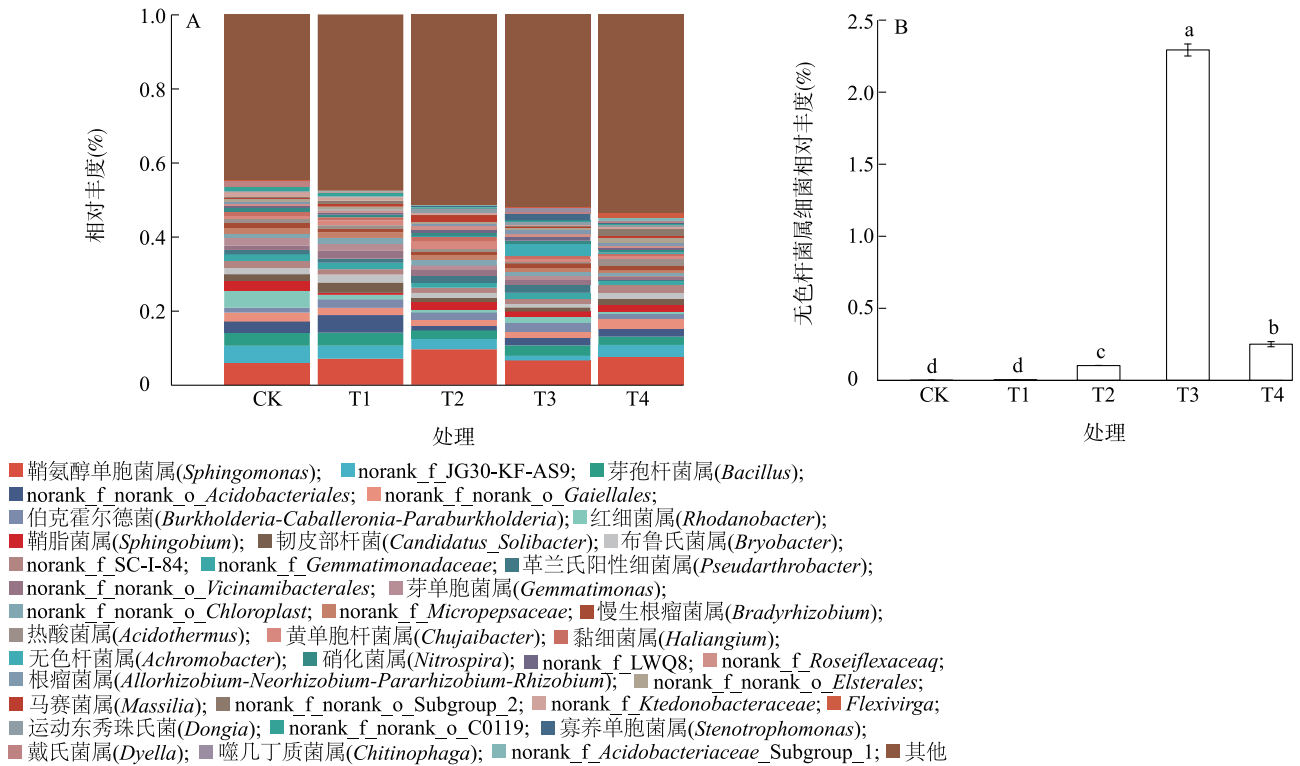


图5 不同处理真菌门水平上植烟土壤微生物群落的相对丰度
Fig.5 Relative abundance of microbial communities at the fungal phylum level in tobacco-growing soils under different treatments

烟土壤细菌群落属水平上,细菌相对丰度较高的菌属为鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)、norank_f_JG30-KF-AS9、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、norank_f_norank_o_Acidobacteriales和norank_f_norank_o_Gaiellales。其中鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)的相对丰度最高。如图6B所示,所有处理相对丰度差异较大的细菌菌属为无色杆菌属(*Achromobacter*)、T3处理植烟土壤中无色杆菌属(*Achromobacter*)细菌的相对丰度显著高于CK、T1处理、T2处理、T4处理($P < 0.05$)。

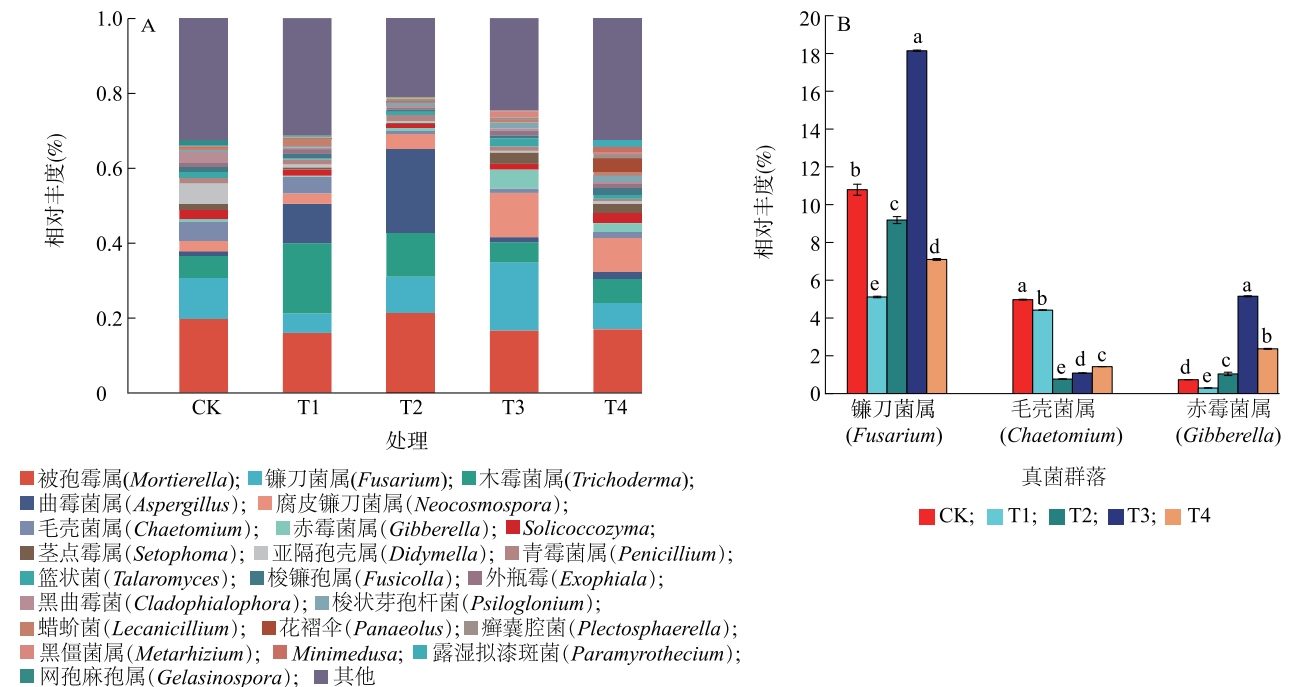
如图7A所示,植烟土壤真菌群落属水平上,真菌相对丰度较高的菌属为被孢霉属(*Mortierella*)、镰刀菌属(*Fusarium*)、木霉菌属(*Trichoderma*)和曲霉菌属(*Aspergillus*)。其中被孢霉属(*Mortierella*)真菌的相对丰度最高。如图7B所示,T3处理植烟土壤中镰刀菌属(*Fusarium*)真菌的相对丰度显著高于CK、T1处理、T2处理和T4处理($P < 0.05$)。CK植烟土壤中毛壳菌属(*Chaetomium*)真菌的相对丰度显著高于T1处理、T2处理、T3处理和T4处理($P < 0.05$)。T3处理植烟土壤中赤霉菌属(*Gibberella*)真菌的相对丰度显著高于CK、T1处理、T2处理和T4处理($P < 0.05$)。



CK:100%无机氮对照;T1:15%有机氮等量替代无机氮;T2:30%有机氮等量替代无机氮;T3 处理:45%有机氮等量替代无机氮;T4:60%有机氮等量替代无机氮。图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 6 不同处理属水平上植烟土壤细菌群落组成

Fig.6 Composition of bacterial communities at the genus level in tobacco-growing soils under different treatments



CK:100%无机氮对照;T1:15%有机氮等量替代无机氮;T2:30%有机氮等量替代无机氮;T3 处理:45%有机氮等量替代无机氮;T4:60%有机氮等量替代无机氮。图柱上不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

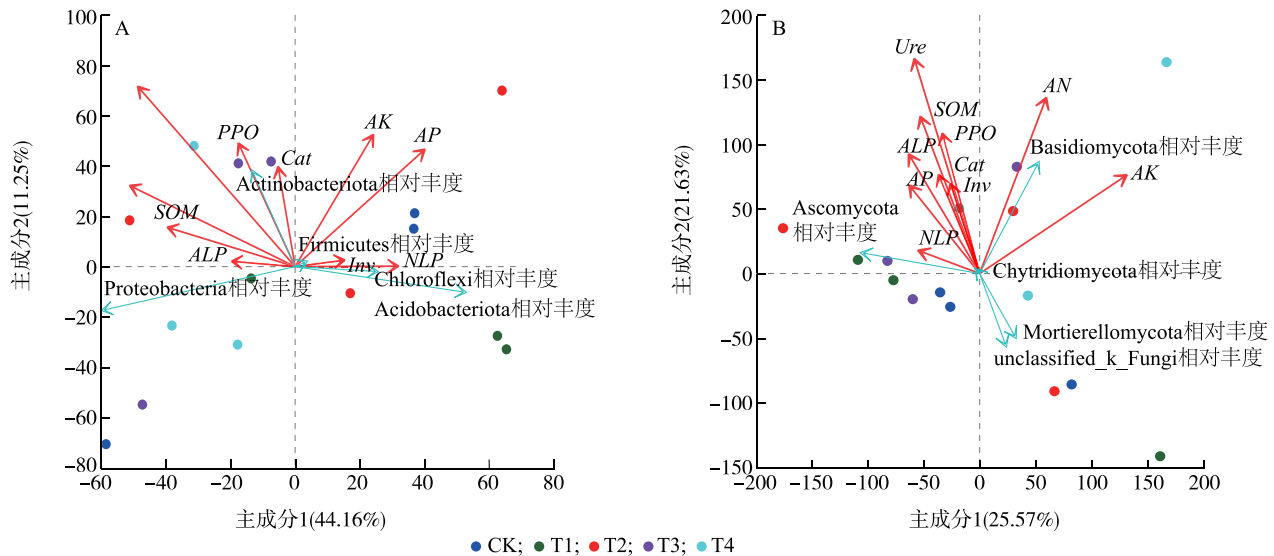
图 7 不同处理属水平上植烟土壤真菌群落组成

Fig.7 Composition of fungal communities at the genus level in tobacco-growing soils under different treatments

2.5 门水平上植烟土壤微生物与环境因子的冗余分析

样本点到环境因子箭头及其延长线的垂直距离能够反映环境因子对样本的影响强度。样本点与环境因子箭头的距离越近,表明环境因子对样本的作用越强。如图 8A 所示,在门水平上,RDA1 和 RDA2 分别解释了细菌群落变异的 44.16% 和 11.25%。土壤环境因子中,碱解氮含量、土壤脲酶活性和速效

磷含量的箭头较长,表明这些因子对植烟土壤细菌群落结构和多样性的影响较大。如图 8B 所示,在门水平上,RDA1 和 RDA2 分别解释了真菌群落变异的 25.57% 和 21.63%。土壤环境因子中,土壤脲酶活性、碱解氮含量和速效钾含量的箭头较长,表明这些因子对植烟土壤真菌群落的影响较大。综上,植烟土壤脲酶活性和碱解氮含量是影响微生物群落结构的主要环境因子。



AN: 土壤碱解氮含量; AP: 土壤速效磷含量; AK: 土壤速效钾含量; SOM: 土壤有机质含量; Ure: 土壤脲酶活性; Cat: 土壤过氧化氢酶活性; Inv: 土壤蔗糖酶活性; PPO: 土壤多酚氧化酶活性; ALP: 土壤碱性磷酸酶活性; NLP: 土壤中中性磷酸酶活性。Proteobacteria: 变形菌门; Actinobacteriota: 放线菌门; Acidobacteriota: 酸杆菌门; Chloroflexi: 绿弯菌门; Firmicutes: 厚壁菌门; Ascomycota: 子囊菌门; Mortierellomycota: 被孢霉菌门; Basidiomycota: 担子菌门; Chytridiomycota: 壶菌门。CK: 100% 无机氮对照; T1: 15% 有机氮等量替代无机氮; T2: 30% 有机氮等量替代无机氮; T3 处理: 45% 有机氮等量替代无机氮; T4: 60% 有机氮等量替代无机氮。

图 8 门水平上植烟土壤微生物与环境因子的冗余分析

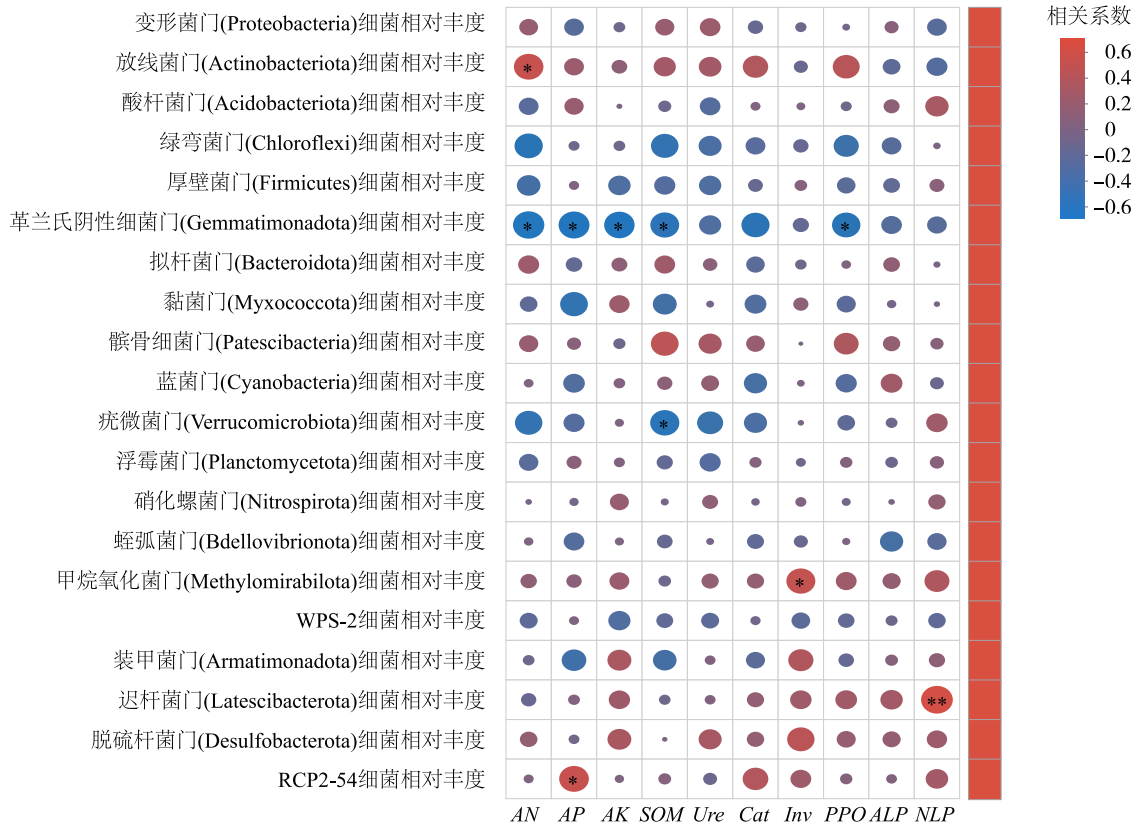
Fig.8 Redundancy analysis of microbial communities at the phylum level in tobacco-growing soils and environmental factors

2.6 门水平上微生物与植烟土壤环境因子的相关性分析

如图 9 所示,在细菌群落门水平上,放线菌门 (Actinobacteriota) 细菌相对丰度与碱解氮含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 革兰氏阴性细菌门 (Gemmatimonadota) 细菌相对丰度与碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量、有机质含量和土壤多酚氧化酶活性呈显著负相关 ($P < 0.05$), 尤其与碱解氮含量的相关性系数最大。疣微菌门 (Verrucomicrobiota) 细菌相对丰度与有机质含量呈显著负相关, 甲烷氧化菌门 (Methylomirabilota) 细菌相对丰度与土壤蔗糖酶活性呈显著正相关 ($P < 0.05$)。迟杆菌门 (Latescibacterota) 细菌相对丰度与土壤中中性磷酸酶活性呈

极显著正相关 ($P < 0.01$), RCP2-54 细菌相对丰度与速效磷含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

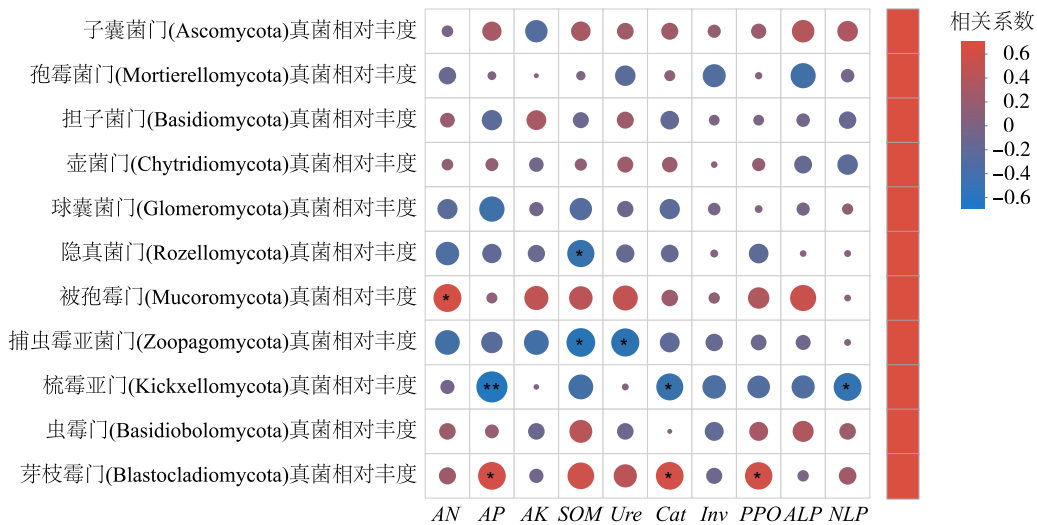
如图 10 所示,在真菌群落门水平上,捕虫霉亚菌门 (Zoopagomycota) 真菌相对丰度与土壤有机质含量和脲酶活性呈显著负相关 ($P < 0.05$), 隐真菌门 (Rozellomycota) 与土壤有机质含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。被孢霉门 (Mucoromycota) 真菌相对丰度与土壤碱解氮含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 梳霉门 (Kickxellomycota) 真菌相对丰度与土壤速效磷含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与土壤过氧化氢酶活性和中性磷酸酶活性呈显著负相关 ($P < 0.05$)。芽枝霉门 (Blastocladiomycota) 真菌相对丰度与土壤速效磷含量、过氧化氢酶活性和多酚氧化酶活性呈显著正相关 ($P < 0.05$)。



AN:土壤碱解氮含量;AP:土壤速效磷含量;AK:土壤速效钾含量;SOM:土壤有机质含量;Ure:土壤脲酶活性;Cat:土壤的过氧化氢酶活性;Inv:土壤蔗糖酶活性;PPO:土壤多酚氧化酶活性;ALP:土壤碱性磷酸酶活性;NLP:土壤中中性磷酸酶活性。*:相关性显著($P < 0.05$); **:相关性极显著($P < 0.01$)。

图9 门水平上细菌与植烟土壤环境因子的相关性分析

Fig.9 Correlation analysis between bacteria at the phylum level and environmental factors in tobacco-growing soils



AN:土壤碱解氮含量;AP:土壤速效磷含量;AK:土壤速效钾含量;SOM:土壤有机质含量;Ure:土壤脲酶活性;Cat:土壤的过氧化氢酶活性;Inv:土壤蔗糖酶活性;PPO:土壤多酚氧化酶活性;ALP:土壤碱性磷酸酶活性;NLP:土壤中中性磷酸酶活性。*:相关性显著($P < 0.05$); **:相关性极显著($P < 0.01$)。

图10 门水平上真菌与植烟土壤环境因子的相关性分析

Fig.10 Correlation analysis between fungi at the phylum level and environmental factors in tobacco-growing soils

2.7 有机氮等量替代无机氮处理对烟草经济效益的影响

如表 3 所示,T3 处理、T4 处理烤烟产量显著高于 CK ($P<0.05$)。T2 处理烤烟产值和中上等烟比例显著高于 CK 和 T4 处理($P<0.05$)。

2.8 有机氮等量替代无机氮处理对烤烟品质的影响

如表 4 所示,各处理 C3F 等级烤烟的感官评价得分排序为:T2>T3>T1>T4>CK。T2 处理烟叶香气质感较好,醇甜略带生青,综合指标较好得分最高。

表 4 不同处理烤烟的感官评价

Table 4 Sensory evaluation of flue-cured tobacco under different treatments

处理	风格特征	香气质得分	香气量得分	杂气程度得分	浓度得分	劲头得分	刺激性得分	回甜感得分	余味得分	总得分	综合评价
CK	醇甜中	5.5	5.5	6.0	5.5	5.5	5.5	5.0	5.0	43.5	中等
T1	醇甜中+	6.0	5.5	5.5	6.0	5.5	5.5	5.5	5.5	45.0	中等
T2	醇甜强	6.5	6.0	6.5	5.5	5.0	6.0	6.0	6.0	47.5	好
T3	醇甜中+	6.0	6.0	6.0	6.5	5.5	5.5	5.5	5.5	46.5	较好
T4	醇甜中	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	44.0	较好

CK:100%无机氮对照;T1:15%有机氮等量替代无机氮;T2:30%有机氮等量替代无机氮;T3 处理:45%有机氮等量替代无机氮;T4:60%有机氮等量替代无机氮。

3 讨论

3.1 有机氮等量替代无机氮处理对植烟土壤养分与酶活性的影响

本研究发现,T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理土壤全氮含量、速效磷含量、速效钾含量和有机质含量均显著高于 CK ($P<0.05$),T2 处理、T3 处理、T4 处理土壤碱解氮含量显著高于 CK ($P<0.05$),表明有机氮肥能够显著改善土壤理化性质,与前人研究结论^[26]一致。T2 处理、T3 处理、T4 处理土壤蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶活性、多酚氧化酶活性、碱性磷酸酶活性、中性磷酸酶活性均显著高于 CK ($P<0.05$)。T2 处理土壤蔗糖酶活性显著高于 CK、T1 处理、T3 处理和 T4 处理($P<0.05$)。T2 处理土壤过氧化氢酶活性显著高于 CK、T1 处理、T4 处理($P<0.05$)。T3 处理土壤多酚氧化酶活性显著高于 CK、T1 处理、T2 处理和 T4 处理($P<0.05$)。总体来说,T2 处理和 T3 处理能够显著提高土壤酶活性。表明适宜的有机氮肥和无机氮肥配比能够有效提高土壤酶活性和养分含量,与前人研究结果^[27-28]一致。

表 3 不同处理烟草的经济效益

Table 3 Economic benefits of tobacco under different treatments

处理	产量 (kg/hm ²)	产值 (元,1 hm ²)	中上等烟比例 (%)
CK	2 132.64b	73 458.62c	78.41b
T1	2 185.66b	75 446.27b	84.35ab
T2	2 303.44ab	78 993.74a	89.56a
T3	2 310.13a	76 832.12ab	85.93ab
T4	2 393.08a	74 569.40b	81.57b

CK:100%无机氮对照;T1:15%有机氮等量替代无机氮;T2:30%有机氮等量替代无机氮;T3 处理:45%有机氮等量替代无机氮;T4:60%有机氮等量替代无机氮。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

3.2 有机氮等量替代无机氮处理对植烟土壤微生物群落结构的影响

土壤微生物是土壤微生态系统中重要组成部分,参与土壤养分循环,是影响植物健康生长的关键环境因子^[29-30]。本研究发现,T2 处理、T3 处理、T4 处理土壤细菌群落 Shannon 指数显著高于 CK、T1 处理($P<0.05$)。T3 处理土壤真菌群落 Sobs 指数、Ace 指数显著高于 CK ($P<0.05$)。T2 处理土壤真菌群落 Shannon 指数、Chao1 指数显著高于 CK ($P<0.05$)。表明 T2 处理、T3 处理能够有效提升土壤微生物 α 多样性。本研究还发现,T2 处理和 T3 处理的土壤全氮含量、速效磷含量、速效钾含量和有机质含量、碱解氮含量均显著高于 CK ($P<0.05$),较高的土壤养分和土壤酶活有利于微生物群落的繁殖,从而导致 T2 处理和 T3 处理土壤微生物群落 α 多样性提高^[31]。

在细菌群落中,变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)、酸杆菌门(Acidobacteriota)、绿弯菌门(Chloroflexi)和厚壁菌门(Firmicutes)为土壤细菌群落中的优势菌门^[32-34]。变形菌门(Proteobacteria)包含多种具有固氮功能的根瘤菌

类^[35-36]。所有处理相对丰度差异较大的细菌菌属为无色杆菌属(*Achromobacter*),无色杆菌属(*Achromobacter*)细菌对无机物具有降解能力^[37]。T3处理土壤中无色杆菌属(*Achromobacter*)细菌的相对丰度显著高于CK、T1处理、T2处理、T4处理($P<0.05$)。土壤真菌群落门水平上,子囊菌门(Ascomycota)、被孢霉菌门(Mortierellomycota)和担子菌门(Basidiomycota)为土壤真菌群落中的优势菌门。子囊菌门(Ascomycota)细菌可以分解土壤中的木质纤维素,提高土壤有机质含量^[38-39]。担子菌门(Basidiomycota)细菌可与烟草形成共生菌根,提高烟草养分吸收效率^[40]。在属水平上,各处理差异较大的真菌菌属为镰刀菌属(*Fusarium*)、毛壳菌属(*Chaetomium*)和赤霉菌属(*Gibberella*)。镰刀菌属真菌(*Fusarium*)是一种致病菌,能够引起烟草枯萎病和根腐病^[41-42]。赤霉菌属真菌(*Gibberella*)可以产生赤霉素,提高烟草抵抗病害的能力^[43]。本研究发现,T2处理土壤镰刀菌属(*Fusarium*)真菌的相对丰度显著低于CK、T1处理、T3处理和T4处理($P<0.05$)。T3处理土壤中赤霉菌属(*Gibberella*)真菌的相对丰度显著高于CK、T1处理、T2处理和T4处理($P<0.05$)。

相关性分析结果表明,放线菌门(Actinobacteriota)细菌的相对丰度与碱解氮含量呈显著正相关($P<0.05$),表明土壤优势菌门细菌显著影响土壤氮素含量,同时土壤氮素含量显著影响土壤微生物群落结构。冗余分析(RAD)结果也表明,土壤脲酶活性和碱解氮含量是影响微生物群落结构的主要环境因子。

3.3 有机氮等量替代无机氮处理对烟草品质的影响

微生物群落的改变直接影响烟叶经济性状。尽管T4处理烤烟产量较高,但T4处理烤烟产值和中上等烟比例显著低于T2处理($P<0.05$),这可能是由于T4处理有机氮施用量较高,土壤中有机氮矿化缓慢,导致烟叶贪青晚熟^[44]。T2处理烟草产值、中上等烟比例和感官评价得分均最高。

4 结论

本研究结果表明,有机氮等量替代无机氮能有效改善土壤环境。其中T2处理提高了土壤全氮含量、速效磷含量、速效钾含量、有机质含量和碱解氮含量,以及土壤蔗糖酶活性、脲酶活性、过氧化氢酶

活性、多酚氧化酶活性、碱性磷酸酶活性、中性磷酸酶活性,同时优化了土壤微生物群落结构,使赤霉菌属(*Gibberella*)真菌相对丰度增加,镰刀菌属(*Fusarium*)真菌相对丰度降低。从生产来看,T2处理提高了烤烟草产值、中上等烟比例,其感官评价得分最高。因此30%有机氮等量替代无机氮(T2处理)是广元烟区最适宜的施肥方式,具有重要的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 唐杰,王昌全,李启权,等. 川北植烟土壤有机质和全氮空间变异研究[J]. 中国烟草学报,2014,20(5):66-72.
- [2] 唐力为,顾会战,吴绍军,等. 广元市植烟土壤养分与其烟叶品质的灰色关联分析[J]. 贵州农业科学,2013,41(7):67-72.
- [3] 张昕. 有机肥与无机氮肥长期定位配施对蔬菜产量及菜田土壤肥力性状的影响[D]. 辽宁:沈阳农业大学,1999.
- [4] 曾希柏. 潞育性水稻土有机无机氮肥配比对土壤养分平衡的影响[J]. 土壤通报,1995(5):210-212.
- [5] 唐莉娜,熊德中. 有机无机肥配施对烤烟氮磷钾营养分配及产量和质量的影响[J]. 福建农业学报,1999,14(2):50-55.
- [6] 卢钰升,顾文杰,李集勤,等. 化肥有机替代对烤烟产质量、土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 中国农学通报,2020,36(16):22-27.
- [7] 朱楠,仇美华,范新会,等. 有机肥部分替代化肥对设施菜地蔬菜产量及土壤质量的影响[J]. 江苏农业学报,2024,40(6):1004-1011.
- [8] 武雪萍,刘增俊,赵跃华,等. 施用芝麻饼肥对植烟根际土壤酶活性和微生物碳、氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(4):541-546.
- [9] 彭智良,黄元炯,刘国顺,等. 不同有机肥对烟田土壤微生物以及烟叶品质和产量的影响[J]. 中国烟草学报,2009,15(2):41-45.
- [10] 李春俭,张福锁,李文卿,等. 我国烤烟生产中的氮素管理及其与烟叶品质的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(2):331-337.
- [11] 罗贞宝,邓家纹,李彩斌,等. 复合生物炭基功能肥对植烟根际土壤水稳性团聚体和酶活性的影响[J]. 贵州农业科学,2023,51(4):59-67.
- [12] 胡国松,郑伟,李震东,等. 烤烟营养原理[M]. 北京:科学技术出版社,2000.
- [13] 许娜,许家来,朱先志,等. 饼肥与化肥配施对烤烟叶片组织结构及有机酸含量的影响[J]. 中国烟草科学,2016,37(1):20-25.
- [14] 任小利,王丽萍,徐大兵,等. 菜粕堆肥与无机肥配施对烤烟产量和品质以及土壤微生物的影响[J]. 南京农业大学学报,2012,35(2):92-98.
- [15] 寇智瑞,周鑫斌,徐宸,等. 有机无机肥配施对黄壤烟田有机碳组分的影响[J]. 土壤,2020,52(1):195-201.

- [16] 汤宏,曾掌权,张杨珠,等. 化学氮肥配施有机肥对烟草品质、氮素吸收及利用率的影响[J]. 华北农学报,2019,34(4):183-191.
- [17] 邱岭军,李亮,张翔,等. 有机无机氮肥用量与配比对土壤生物学特性及烟叶品质的影响[J]. 土壤通报,2020,51(4):920-927.
- [18] 沈万科,闫金朋,顾明华,等. 施用不同比例有机氮对烤烟产量的影响[J]. 西南农业学报,2018,31(7):1498-1503.
- [19] 丁梦娇,黄莺,易维洁,等. 施用有机肥对植烟土壤氮素转化与功能微生物的影响[J]. 西南农业学报,2016,29(5):1166-1171.
- [20] 湛凯翔,龙健,李娟,等. 施用有机物料对黄壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J]. 土壤通报,2024,55(5):1282-1291.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [23] 温焯琳,马宜林,周俊学,等. 腐熟羊粪有机肥配施无机肥对植烟土壤微生物群落结构和多样性的影响[J]. 土壤,2023,55(4):804-811.
- [24] 国家烟草专卖局. 烟草在制品感官评价方法:YC/T 415-2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [25] 吴文信,李思军,谭志鹏,等. 打顶时间和方式对烤烟经济性状和烟叶品质的影响[J]. 农学学报,2024,14(8):9-15.
- [26] 张永军,张斌,文俊明,等. 有机肥对烤烟产量和根际土壤细菌群落的影响[J]. 分子植物育种,2025(2):1-12.
- [27] 李苹,付弘婷,逢玉万,等. 有机肥配施化肥对柑橘养分吸收及土壤酶活力的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(3):39-45.
- [28] 涂攀峰,王川,张伟丽,等. 化肥减施及配施有机肥对荔枝生长及根际微生物的影响[J]. 广东农业科学,2023,50(2):59-66.
- [29] 焦晓丹,吴凤芝. 土壤微生物多样性研究方法的进展[J]. 土壤通报,2004,35(6):789-792.
- [30] 李正辉,殷全玉,马君红,等. 羊粪有机肥对洛阳植烟土壤微生物群落结构和功能的影响[J]. 山东农业科学,2022,54(5):84-97.
- [31] 田丰,黄土航,区禧贤,等. 有机肥配施化肥对烟草生长、养分吸收及分配的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(18):138-146.
- [32] ZHANG Y J, LIU G S, YE X F, et al. Changes of soil enzyme activities and microorganism amounts at different growing stages of flue-cured tobacco[J]. Soils,2010,42(1):39-44.
- [33] 施河丽,向必坤,彭五星,等. 有机无机肥料配施对植烟土壤养分及细菌群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(4):58-66.
- [34] 郭婷,门杰,卢萍萍,等. 河北省黑龙江区有机肥替代氮肥对小麦产量形成及土壤微生物群落的影响[J]. 中国土壤与肥料,2024(8):119-127.
- [35] 武春屹,罗莎莎,杨婷,等. 氮减量配施微生物菌剂对烤烟产量和土壤微生物多样性的影响[J]. 广东农业科学,2023,50(8):52-65.
- [36] LI Z D, JIAO Y Q, YIN J, et al. Productivity and quality of banana in response to chemical fertilizer reduction with bio-organic fertilizer: insight into soil properties and microbial ecology[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2021,322:107659.
- [37] 李妮,李张,李明雄,等. 一株无色杆菌属菌株对孔雀绿的脱色降解[J]. 应用与环境生物学报,2009,15(4):529-533.
- [38] SOUZA R C, MENDES I C, REIS-JUNIOR F B, et al. Shifts in taxonomic and functional microbial diversity with agriculture: how fragile is the Brazilian Cerrado? [J]. BMC Microbiology,2016,16:1-15.
- [39] 李宏城,高正峰,李先伟,等. 有机肥替代氮肥对烟草青枯病发生及土壤微生物群落的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(18):261-269.
- [40] 陈力力,刘金,李梦丹,等. 水稻-油菜双序列复种免耕、翻耕土壤真菌多样性[J]. 激光生物学报,2018,27(1):60-68,59.
- [41] 姚晨斌,李小杰,李琦,等. 烟草尖孢镰刀菌拮抗真菌的筛选鉴定及促生作用研究[J]. 中国生物防治学报,2021,37(5):1066-1072.
- [42] 邱睿,李小杰,白静科,等. 烟草镰刀菌根腐病生防假单胞菌的筛选与鉴定[J]. 中国烟草学报,2023,29(3):84-93.
- [43] CHEN L C, SUN S H, SONG C P, et al. Nitric oxide negatively regulates gibberellin signaling to coordinate growth and salt tolerance in *Arabidopsis* [J]. Journal of Genetics and Genomics,2022,49(8):756-765.
- [44] 何进勤,雷金银,桂林国,等. 不同氮水平及生物有机肥对旱地土壤养分和马铃薯产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(10):191-196.

(责任编辑:成纾寒)