

不同农艺措施对烟田土壤真菌群落结构和功能的影响

娄俊鑫¹, 刘泓¹, 沈少君^{2*}, 冯芷茵¹, 何冬冬¹, 吴树松²,
陈炜², 江桂花², 常鹏飞², 彭国华²

(1.福建农林大学资源与环境学院,福州 350000; 2.福建省烟草公司龙岩市公司,福建 龙岩 364000)

摘要:为了解除草剂、地膜及高温火焰处理等农艺措施对土壤真菌群落及功能的影响,利用高通量测序技术及 FUNGuild 功能预测方法分析了不同处理烟田土壤真菌群落组成和功能特性。研究共设置 7 个处理,分别为:对照(CK)、施除草剂+覆盖地膜处理(T1)、单施除草剂处理(T2)、单覆盖地膜处理(T3)、覆盖地膜+中档火焰处理(T4)、中档火焰处理(T5)和高档火焰处理(T6)。结果表明,供试土壤真菌群落主要由担子菌门、子囊菌门和被孢霉门构成,不同农艺措施对土壤 α 多样性指数无显著影响,但对真菌属丰度和真菌群落结构影响显著。与对照相比,覆盖地膜和中、高档火焰处理的土壤中病理营养型真菌丰度显著降低,烤烟患真菌病害的风险下降;施除草剂的土壤中烤烟真菌病害的发病风险下降,但由于土壤腐生真菌的减少,不利于土壤有机质的分解。

关键词:土壤;真菌群落;除草剂;地膜;高温火焰

Effects of Different Agronomic Measures on the Structure and Function of Soil Fungi Community in Tobacco Fields

LOU Junxin¹, LIU Hong¹, SHEN Shaojun^{2*}, FENG Zhihan¹, HE Dongdong¹, WU Shusong²,
CHEN Wei², JIANG Guihua², CHANG Pengfei², PENG Guohua²

(1.College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350000, China; 2. Longyan Tobacco Company of Funjian Province, Longyan, Fujian 364000, China)

Abstract: In order to find out the effects of different agronomic measures such as herbicide, mulch and megathermal flame on soil fungal community and function, high-throughput sequencing and FUNGuild were used to analyze the soil fungal community structure and functional groups under different agronomic measures. There were seven treatments, including control (CK; no herbicide, no mulching film and no megathermal flame treatment), apply herbicide + mulching film treatment (T1), apply herbicide treatment (T2), mulching film treatment (T3), mulching film + mid-range firepower flame treatment (T4), mid-range firepower flame treatment (T5) and high-grade firepower flame treatment (T6). The results showed that the soil fungi community was mainly composed of *Basidiomycete*, *Ascomycete* and *Mortierella*. No significant effect on soil α diversity index was observed, but there was significant difference in fungal genus abundance and fungal community structure between different agronomic measures. Compared with the control, the abundance of pathotroph fungi was significantly reduced in the soil of mulching film treatment, mid-range firepower flame treatment and high-range firepower flame treatment, in which the risk of fungal diseases in tobacco decreased. As for the herbicide treatment, the risk of fungal diseases also decreased, but the reduction of saprotroph may lead to inhibited decomposition of soil organic matter.

Keywords: soil; fungal community; herbicide; mulch; megathermal flame

真菌作为土壤微生物的重要成员,与土壤中的其他微生物一起推动陆地生态系统的物质循环和能量流动^[1]。它们一方面作为土壤有机物的分解者,促进营养物质的转化,供植物吸收利用,是有益菌;另一方面,它们作为病原菌入侵植物,使作物发生病害,造成农作物产量和品质的下降。土壤中有机质等养分的转化均与土壤真菌群落的组成和丰度

相关,同时土壤理化性质和植株根系作用也会影响土壤有机质等养分的转化,同时土壤理化性质和植株根系作用也会影响真菌的物种组成和数量。

杂草控制不当可严重影响烟草的产量和品质,所以化学除草剂在烟田的使用十分普遍。然而除草剂的泛滥使用不仅会破坏农田生态系统,药物残留可能还会导致烟苗产生畸形,影响其正常生长。为

基金项目:福建省烟草公司科技项目“烟田高温灭菌替代除草剂技术开发应用研究”(2019350000240004)、“套餐式全元功能烟草肥料的研制与应用”(2019350000240149)

作者简介:娄俊鑫(1995-),女,在读硕士,研究方向为土壤学。E-mail:1659335616@qq.com。*通信作者,E-mail:26356139@qq.com

收稿日期:2019-07-15

修回日期:2019-11-28

此,环境友好型杂草防除技术替代化学除草剂的运用研究备受瞩目。物理除草技术中的火焰除草主要是利用可燃气体作为燃料,通过人工操作控制,当喷着火焰的除草机经过烟田土壤畦面时,火焰高温会使田间杂草细胞水分迅速蒸发,短时间内全部死亡,并对土壤起到高温灭菌的作用。覆盖地膜对杂草亦有一定的防除效果^[2]。然而这些农艺措施的应用对土壤真菌群落结构和功能的影响并不清楚。本文采用高通量测序技术结合 FUNGuild 分析,研究除草剂、地膜和火焰高温处理等农艺措施对烟田土壤真菌群落组成、多样性及结构的影响,为烤烟的科学栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2018—2019 年在福建省龙岩市武平县万安乡进行,试验田地势平坦、光照良好、排灌方便、肥力中等,烟稻轮作。

土壤基本理化性质 pH 5.0,碱解氮 94.81 mg/kg,有效磷 71.82 mg/kg,速效钾 93.23 mg/kg。试验采用随机区组设计,处理设置如表 1,每个处理 3 次重复,每重复 1 畦,面积 67 m²。地膜采用黑色聚乙烯材料薄膜,于烟畦盖膜前 1~2 d 施用除草剂及进行火焰高温处理;烟田均用烟舒除草剂 150 mL/667 m² (总有效成分 40%,其中仲丁灵 30%、异噁草松 10%) 兑水稀释 600~800 倍施入土壤;火焰高温处理采用自主研发的肩背式烟田高温灭菌装置^[3],设有大、中、小 3 种调节档位,该装置的中档火力压强为 6 kPa,高档火力压强为 9 kPa,实施时以喷咀距离畦面 3~4 cm 为宜,喷射出的火焰与土壤畦面接触 1~2 秒,匀速向前;养分施用及其他农事操作均按照当地云烟 87 品种技术方案执行。

在烤烟旺长期进行土壤样品采集,每个小区随

机选取 1 株有代表性的烟株,采用抖根法获取根际土壤,挑除石子和根等杂质,充分混匀后,用四分法取样并保存于 50 mL 离心管中,用冰盒运至实验室用于土壤微生物总 DNA 的提取。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤微生物总 DNA 的提取 使用 Fast DNA Spin Kit for Soil DNA 提取试剂盒(MP Bio-medicals, USA)提取样品中的总 DNA。选用引物 ITS5-1737F (5'-GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG-3') 和 ITS2-2043R (5'-GCTGCGTTC-TTCATCGATGC-3') 扩增真菌 18S rRNA 基因中的 ITS1 区段,PCR 产物送至诺禾致源生物信息科技有限公司,利用 HiSeq 测序平台进行高通量测序。

1.2.2 高通量测序数据分析 根据 Barcode 序列和 PCR 扩增引物序列从 Hiseq 高通量测序原始序列中分出各样品数据,对其进行拼接,对拼接后的序列进行质控并修剪低质量的序列。对数据进行 OTU 聚类分析、Alpha 多样性分析、Beta 多样性分析及功能预测统计分析。

1.2.3 数据处理和作图 用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 21.0 软件进行数据分析和正态分布检验,满足方差齐性采用 Duncan 法进行方差检验,不满足方差齐性采用 Dunnett's T3 检验。

2 结果

2.1 不同农艺措施对真菌丰度和多样性的影响

Alpha (α) 多样性是一个特定区域或生态系统内部的多样性。其中, Ace 和 Chaol 为菌群分布丰度 (Community richness) 指数,值越大代表物种总数越多; Simpson 和 Shannon 是菌群分布多样性 (Community diversity) 指数,若群落的多样性程度越高, Simpson 和 Shannon 值就越大。Goods coverage 指各样品文库的覆盖率,其值越高,表明样本中序列没有被测出的概率越低。如表 2 所示,各处理的测序深度指数 (Goods coverage 指数) 均高于 99%,说明此次的测序数据能较真实地反映样本中真菌的多样性。与对照相比,各处理的 Simpson、Shannon、Ace 和 Chaol 等指数均无显著差异,说明在烤烟旺长期,除草剂、地膜和火焰高温处理等农艺措施处理下的土壤真菌丰度和多样性无显著变化,它们对土壤真菌的丰度和多样性影响不显著。

表 1 不同处理的农艺措施

Table 1 Agronomic measures of different treatments

处理	具体农艺措施
Treatment	Specific agronomic measures
CK	不施除草剂、不覆盖地膜、不进行火焰高温处理。
T1	施除草剂、覆盖地膜、不进行火焰高温处理。
T2	施除草剂、不覆盖地膜、不进行火焰高温处理。
T3	不施除草剂、覆盖地膜、不进行火焰高温处理。
T4	不施除草剂、覆盖地膜、进行火焰高温处理-中档火力。
T5	不施除草剂、不覆盖地膜、进行火焰高温处理-中档火力。
T6	不施除草剂、不覆盖地膜、进行火焰高温处理-高档火力。

表2 不同处理土壤真菌 α 多样性指数

Table 2 The number of fungi richness and diversity under different treatments

处理	香农指数	辛普森指数	Chao1 指数	ACE 指数	测序深度
Treatment	Shannon	Simpson	Chao1	ACE	Goods coverage
CK	4.849abc	0.877ab	1115.7a	1159.4a	0.997a
T1	4.142c	0.808b	917.3a	942.5a	0.997a
T2	4.901abc	0.901ab	1079.3a	1117.2a	0.997a
T3	4.293bc	0.859ab	1176.2a	1072.2a	0.996a
T4	4.778abc	0.889ab	1055.6a	1096.9a	0.996a
T5	5.049ab	0.918a	987.9a	1016.5a	0.997a
T6	5.538a	0.937a	1156.7a	1176.8a	0.997a

注：同列小写字母不同表示不同处理样本差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: letters with different labels in the same column indicate significant difference between groups ($p < 0.05$).

2.2 不同农艺措施对真菌群落结构的影响

基于 Weight Unifrac 距离矩阵进行 PCoA (主坐标) 分析 (图 1)。其中, PC1 代表能最大程度区分所有样本的第一主坐标轴, 可以解释样本中所有差异的 35.30%; PC2 代表能最大区分所有样本的第二主坐标轴, 可以解释样本中所有差异的 29.38%; 这两轴形成的第一个平面展示了样本间 65% 左右的差异。样本聚类中样本点之间距离越近, 表明群落构成越相似, 彼此间差异越小。除 T1 的 3 个子样本较为离散之外, 各样本的子样本之间表现出明显的组间聚集, 表明同一样本之间的真菌群落结构相似性较高。其中, T2 和 T6 距离较近, T4 和 T5 距离较近, 说明 T2 和 T6、T4 和 T5 的真菌群落结构差异性较小。CK 和 T1、T3 之间的距离较远, 说明它们的真菌群落结构差异性较大。PCoA 分析表明, 地膜、除草剂和火焰处理等农艺措施在一定程度上均会改变土壤真菌群落结构, 且土壤真菌群落构成的组间差异明显大于组内差异。

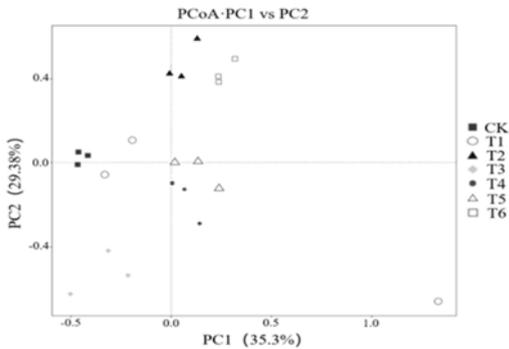


图1 不同处理的土壤真菌群落 PCoA 分析

Fig. 1 PCoA analysis of soil fungal communities under different treatments

2.3 不同处理对真菌门水平群落组成的影响

根据物种注释结果, 生成土壤真菌在门水平上的

物种相对丰度柱状堆积图 (图 2)。如图所示, 不同处理的土壤真菌 TOP10 的菌门分别为: 担子菌门 (*Basidiomycota*)、子囊菌门 (*Ascomycota*)、被孢霉门 (*Mortierellomycota*)、壶菌门 (*Chytridiomycota*)、隐菌门 (*Rozellomycota*)、捕虫霉门 (*Zoopagomycota*)、新丽鞭毛菌门 (*Neocallimastigomycota*)、油壶菌门 (*Olpidiomycota*)、球囊菌门 (*Glomeromycota*) 和芽枝霉门 (*Blastocladiomycota*)。其中优势菌门 (相对丰度大于 10%) 为 *Basidiomycota*、*Ascomycota* 和 *Mortierellomycota*, 三者相对丰度之和占到了各组总测序丰度的 65.84%~82.57%, 与 CK 相比, T1、T4 以及 T5 均显著降低了 *Basidiomycota* 的相对丰度; T3、T4 和 T5 均使 *Ascomycota* 的相对丰度显著升高; *Mortierellomycota* 的丰度在各处理间差异均未达显著水平。

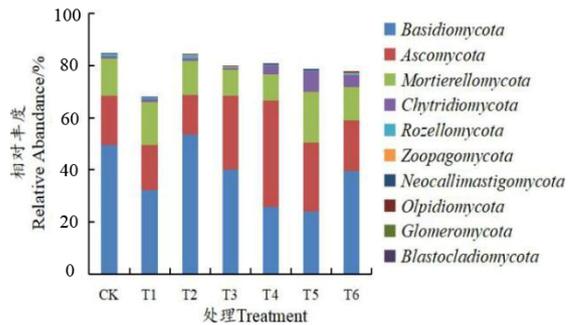


图2 不同处理土壤真菌门水平的相对丰度 (TOP10)

Fig. 2 Relative abundance of soil fungal under different agronomic measures in phylum level (TOP10)

2.4 不同处理对真菌属水平群落组成的影响

如图 3 所示, 根际真菌在属水平上优势菌属 (相对丰度大于 1%) 分别为田头菇属 (*Agrocybe*)、短梗蠕孢属 (*Trichocladium*)、青霉菌属 (*Penicillium*)、曲霉属 (*Aspergillus*)、粪伞属 (*Bolbitius*)、被孢霉属 (*Mortierella*)、*Saitozyma*、镰刀菌属 (*Fusarium*) 和 *Papiliotrema*, 共占根际真菌群落的 31.5%~56.1%。在优势属中, 和 CK 相比, T2 处理显著降低了 *Agrocybe*、*Penicillium* 和 *Fusarium* 的相对丰度; T3 处理使 *Trichocladium*、*Penicillium* 和 *Aspergillus* 的相对丰度显著升高, 使 *Bolbitius*、*Mortierella* 和 *Fusarium* 的相对丰度显著降低; T5 处理显著降低了 *Agrocybe*、*Bolbitius*、*Saitozyma*、*Fusarium* 和 *Papiliotrema* 的相对丰度, 显著提高了 *Trichocladium* 和 *Mortierella* 的相对丰度; T1 处理显著降低了

Agrocybe、*Bolbitius* 和 *Fusarium* 的相对丰度；T4 处理显著降低了 *Agrocybe*、*Bolbitius* 和 *Fusarium* 的相对丰度，显著提高了 *Trichocladium* 和 *Penicillium* 的相对丰度。此外，T5 和 T6 处理对比可知，与中档火力的火焰处理相比，高档火力显著降低了 *Trichocladium*、*Penicillium* 和 *Mortierella* 的相对丰度，显著提高了 *Bolbitius* 的相对丰度。

2.5 不同农艺措施对土壤真菌营养型及功能群的影响

根据 FUNGuild 对不同农艺措施处理的土壤真菌群落的营养型 (Trophic mode) 和功能群 (Guild) 进行鉴定分类，将检测出的 2547 个 OTU (可操作分类单位) 按照营养方式划分为三大类型，分别为共生营养型 (symbiotroph)、腐生营养型 (saprotroph)

和病理营养型 (pathotroph)，统计同时含多种复合营养型和功能群的真菌类群可知，本研究共有 8 种营养型 (图 4)，总共检测出 42 种功能群，针对丰度较高的 8 种主要功能群进行分析 (图 5)。

如图 4 所示，烟草旺长期，土壤真菌以腐生营养型为主，其相对丰度占总量的 30.88%~55.51%，且 CK 处理的腐生营养型真菌丰度显著高于 T2 处理。对于共生营养型真菌而言，各处理中没有观察到 CK 和 T1~T5 处理间的显著差异。和 CK 相比，T1、T3 和 T4 处理中病理营养型真菌的相对丰度显著降低，而 T5 处理的病理营养型真菌显著升高。此外，T5 和 T6 对比可知，与中档火力的火焰处理相比，高档火力火焰处理显著降低了土壤中腐生营养型和病理营养型真菌的相对丰度。

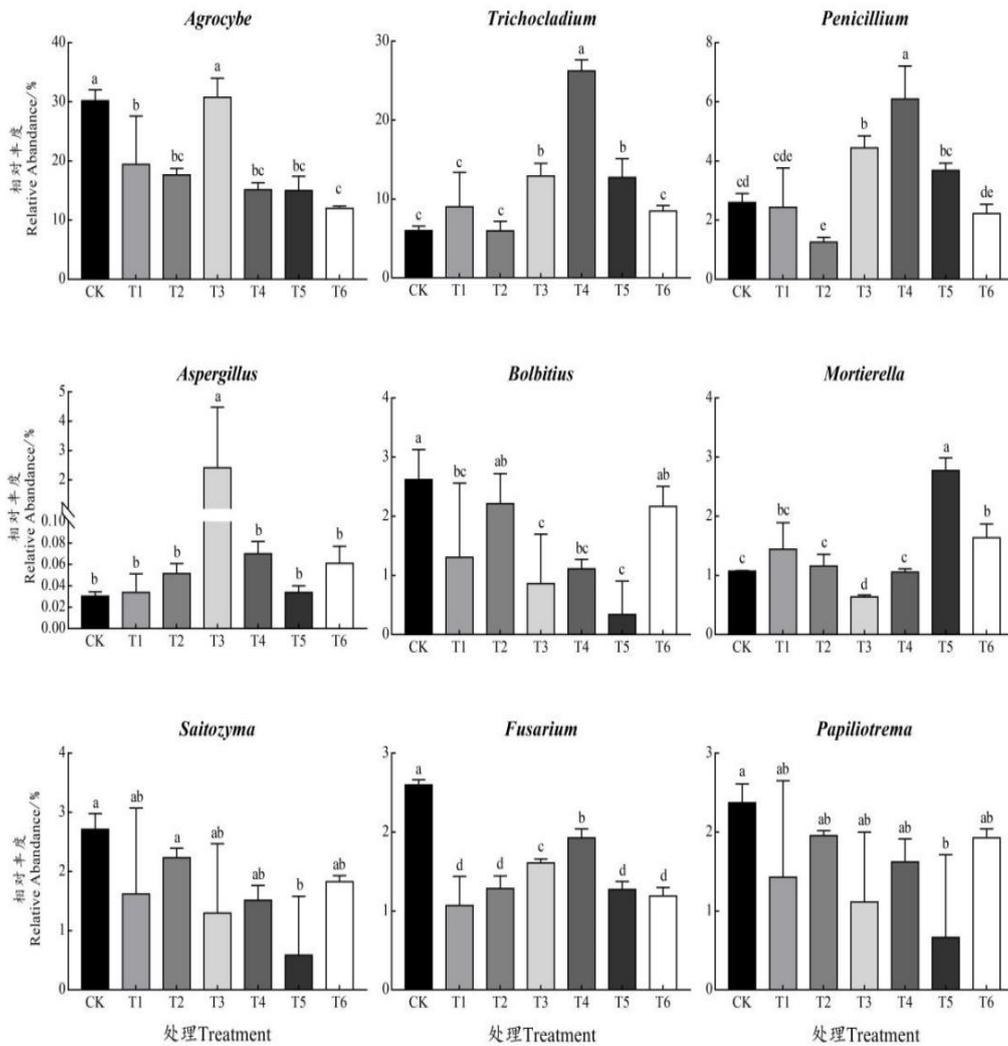


图 3 不同处理土壤优势真菌属水平的相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of soil dominant fungi under different treatments in genus level

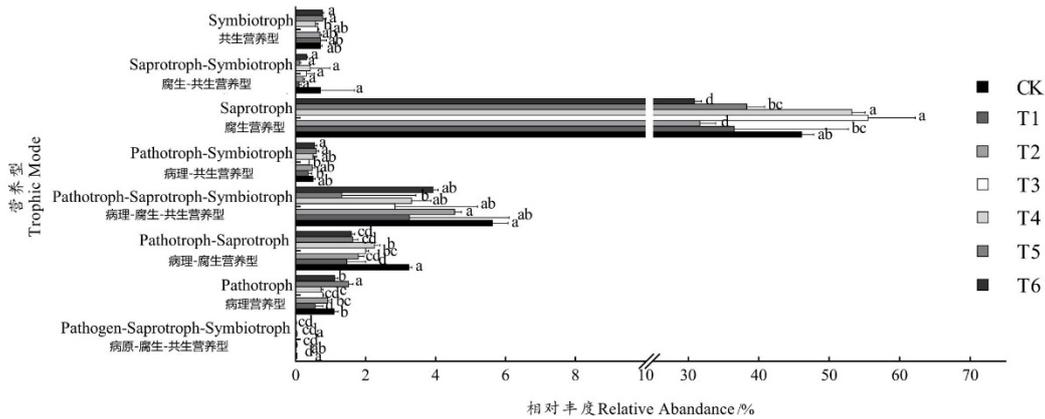


图4 旺长期不同处理土壤真菌的营养型

Fig. 4 Trophic mode of soil fungi under different treatments in vigorous period of tobacco

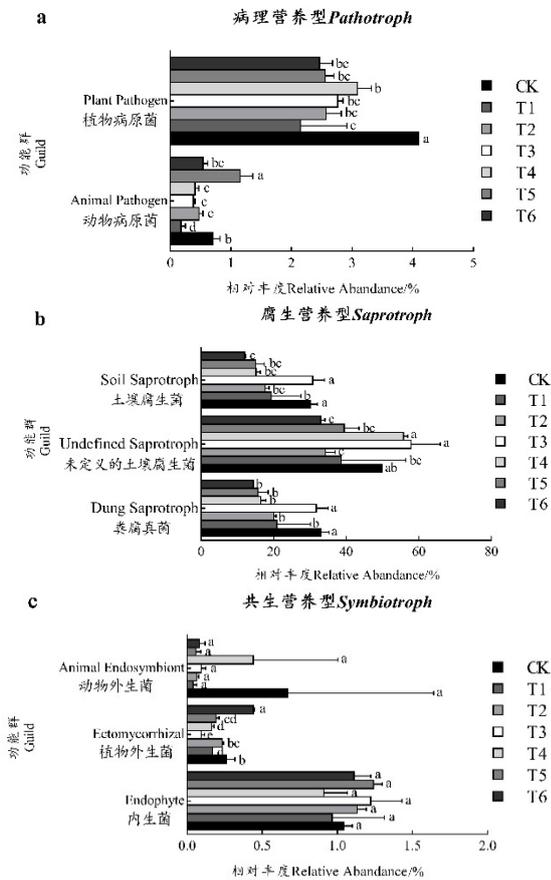


图5 旺长期不同处理土壤真菌的主要功能群

Fig. 5 Main guild of soil fungi under different treatments in vigorous period of tobacco

鉴定土壤中的真菌功能群，并对三大营养型的优势功能群进行分析比较(图5)。土壤中病理营养型真菌的主要功能群为动物病原菌(Animal Pathogen)和植物病原菌(Plant Pathogen)(图5a)。和CK相比，T1~T5处理的土壤植物病原菌丰度均显著下降；T1~T4处理的动物病原菌数量显著降低，而T5处理的动物病原菌丰度明显升高；此外，与

中档火力的火焰处理相比，高档火力显著降低了动物病原菌数量。对于腐生营养型真菌而言，优势功能群分别为土壤腐生真菌(Soil Saprotroph)、粪腐真菌(Dung Saprotroph)和未定义的土壤腐生菌(Undefined Saprotroph)(图5b)。除T3外，各处理的土壤腐生真菌和粪腐生真菌数量均显著低于CK处理；比较T5和T6的腐生营养型真菌的优势功能群可知，高档火力的火焰处理和中档火力的火焰处理的优势腐生菌数量差异均未达显著水平。由图5c可知，CK处理的内生菌(Endophyte)和动物外生菌(Animal Endosymbiont)和各处理相比差异不显著，但植物外生菌(Ectomycorrhizal)丰度显著高于T1、T3、T4和T5处理。与中档火力的火焰处理相比，高档火力的火焰处理显著提高了植物外生菌的数量。

此外，由于FUNGuild数据库的局限性，未被鉴定分类的OTU也不能忽略，因为它们的相对丰度占总量的比例相对较高，达37.52%~60.82%。

3 讨论

3.1 除草剂对植烟土壤真菌群落及功能的影响

本研究结果表明，与对照处理相比，除草剂未显著影响土壤真菌群落α多样性，但显著改变土壤真菌群落结构。姚斌等^[4]研究认为，除草剂施入土壤可能会使土壤微生物可利用的碳源种类发生改变，由于除草剂污染的土壤中真菌等微生物对碳源的利用能力不同，可能使微生物群落内部种群的相互关系发生变化，原有的平衡遭受破坏，优势类群改变，从而造成群落差异。

烟田施用除草剂能显著降低土壤中田头菇属、青霉菌属和镰刀菌属的相对丰度。田头菇属和青霉菌属真菌大多为腐生真菌，其中青霉菌属真菌是导致烟叶霉变的重要组成部分之一^[5]；镰刀菌属真菌是一种常见的烟草病原微生物，某些种可通过侵染烟草根系，伤害烟草的根系组织和维管束组织危害烟草，从而引发烟草根腐病^[6]。因此，可以认为，除草剂的施用可以降低烤烟根腐病的病害风险，也可能会减少烟叶霉病的发生率。

FUNGuild 分析显示，施用除草剂的土壤中腐生营养型真菌数量显著下降，其优势功能群土壤腐生真菌和粪腐生真菌数量和对照处理相比差异均达显著水平；此外，土壤中病理营养型真菌的优势功能群植物病原菌和动物病原菌的数量也显著减少。腐生真菌可以通过降解死亡的宿主细胞获取养分，与有机物分解和养分循环密切相关^[7]；还可以产生一系列水解酶和氧化酶，有助于碳水化合物的分解，增加土壤有机质养分^[8]。因此，施用除草剂使土壤中腐生真菌丰度下降，可能导致土壤养分循环和有机质分解速率减弱。

3.2 地膜对植烟土壤真菌群落及功能的影响

刘岳飞等^[9]研究指出地膜不同程度地提高土壤微生物碳、氮、磷等养分状况。本研究发现，地膜未改变土壤真菌菌群多样性指数；但会使真菌群落的多样性发生明显变化。覆膜处理后，由于地膜具有提高地温、涵养水分以及加速有机质分解和提高养分利用率等作用，微生物生长环境得到一定改善，微生物种内竞争和种间竞争、微生物和作物对养分和水分的竞争等减弱，使土壤微生物群落结构稳定趋于一致化发展，从而使对照处理和覆膜处理土壤中真菌群落结构产生差异。

对土壤优势真菌属丰度分析可知，覆膜处理后镰刀菌属相对丰度显著降低可能使烤烟患根腐病的风险下降。此外，FUNGuild 分析显示，覆膜处理显著减少土壤中病理营养型真菌的数量，其优势功能群植物病原菌和动物病原菌的相对丰度均显著降低。病理营养型真菌通过损害宿主细胞而获取营养，土壤中病理营养型真菌对植物的生长具有一定负面影响^[10]。综上所述，覆膜处理可以通过降低土壤中病理营养型真菌的数量而降低烤烟患真菌病害的风险。

3.3 火焰高温处理对植烟土壤真菌群落及功能的影响

与对照相比，中档火力火焰处理能显著降低田头菇属、粪伞属、镰刀菌属的相对丰度，显著提高青霉菌属和被孢霉属等的相对丰度。被孢霉属真菌能分解有机物质，促进植物根系吸收矿质元素，此外它还具有潜在分泌抗菌素的能力，能抑制病原菌，如镰刀菌属^[11-12]。因此，可以认为中档火力火焰处理能降低烤烟患根腐病的发病率，还有利于烟株根系对土壤矿质养分的吸收。

此外，由于高档火力火焰处理病原菌数量显著低于中档火力火焰处理，其患真菌病害的可能性低于中档火焰处理；但与中档火力火焰处理相比，高档火力火焰处理的土壤中与土壤矿质养分吸收正相关的被孢霉属以及与促进有机质分解和养分循环正相关的腐生真菌和外生菌数量的减少可能会影响烤烟对有效养分的吸收利用。

4 结 论

试验结果表明，不同农艺措施土壤真菌优势属的相对丰度差异显著。除草剂、地膜和火焰处理等农艺措施不影响土壤真菌的 α 多样性指数，但显著影响土壤真菌群落结构多样性。与对照相比，覆盖地膜和中、高档火焰处理的土壤中病理营养型真菌丰度显著降低，烤烟患真菌病害的风险下降。此外，与中档火力火焰处理相比，高档火力火焰处理在一定程度上降低土壤有效养分循环和有机质分解，且增加用气量；施除草剂的土壤中烤烟真菌病害的发病风险下降，但由于土壤腐生真菌的减少，不利于土壤有机质的分解。综上所述，中档火焰除草方式及覆膜处理对土壤真菌群落及功能无显著不利影响，且能降低烟草真菌病害。

参考文献

- [1] 赵吉, 廖仰南. 羊草草地分解者亚系统的特性及作用[J]. 生态学报, 1995, 15(4): 359-364.
ZHAO J, LIAO Y N. Characteristics and functions of sub-systems of leymus chinensis and grassland decomposers[J]. Chinese Journal of Ecology, 1995, 15(4): 359-364.
- [2] 樊彦兵. 马铃薯黑色地膜全覆盖除草效果初报[J]. 甘肃农业科技, 2013(9): 35-37.
FAN Y B. Preliminary report on the effect of potato black mulch on full weeding[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2013(9): 35-37.
- [3] 沈少君, 陈炜, 吴树松, 等. 烟田灭菌手推车: 中国, 201830532749x [P]. 2019-01-29.
SHEN S J, CHEN W, WU S S, et al. Tobacco sterilization trolley: Chinese: 201830532749x[P]. 2019-01-29.

- 版社, 2002.
- ZHU X C, WANG Y T, WANG Z F. Tobacco diseases of china[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002.
- [4] 王革, 郑小波, 陆家云, 等. 云南省烟草黑胫病菌对甲霜灵抗性的检测[J]. 南京农业大学学报, 1997, 20(4): 105-107.
- WANG G, ZHENG X B, LU J Y, et al. Detection of resistance of black shank to metaxyl in yunnan province[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1997, 20(4): 105-107.
- [5] 王晶晶, 蒋士君, 常淑娴, 等. 两株生防菌对烟草黑胫病的抑制活性及其鉴定[J]. 中国烟草学报, 2011, 17(6): 89-93.
- WANG J J, JIANG S J, CHANG S X, et al. Antifungal activity of two biocontrol strains against tobacco black shank and their identification[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2011, 17(6): 89-93.
- [6] 易龙, 肖崇刚, 马冠华, 等. 拮抗放线菌 TA21 对烟草根黑腐病菌的抑制及其控病作用[J]. 中国生物防治, 2010, 26(2): 186-192.
- YI L, XIAO C G, MA G H, et al. Biocontrol effect and inhibition activity of antagonistic actinomycetes strain TA21 against *Thielaviopsis basicola*[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2010, 26(2): 186-192.
- [7] 梁元存, 刘延荣, 王玉军, 等. 烟草黑胫病菌致病性分化和烟草品种的抗病性差异[J]. 植物保护学报, 2003, 30(2): 143-147.
- LIANG Y C, LIU Y R, WANG Y J, et al. Pathogenicity differentiation of *Phytophthora parasitica* and the disease resistance difference of tobacco against black shank[J]. Acta Phytopythologica Sinica, 2003, 30(2): 143-147.
- [8] 白宝璋, 金锦子, 白崧. 玉米根系活力 TTC 测定法的改良[J]. 玉米科学, 1994, 2(4): 44-47.
- BAI B Z, JIN J Z, BAI S. Improvement of TTC method determining root activity in corn[J]. Maize Science, 1994, 2(4): 44-47.
- [9] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [10] 张龙翔. 生化试验方法和技术[M]. 1 版. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- ZHANG L X. Biochemical test methods and techniques[M]. 1st edition. Beijing: Higher Education Press, 1997.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- GAO J F. Plant physiology experiment guide[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [12] 刘萍, 李明军. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- LIU P, LI M J. Plant physiology experiment technique[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [13] 刘明鑫, 马光恕, 廉华, 等. 棘孢木霉 T437 对黄瓜幼苗根系生理特性及立枯病防效的研究[J]. 现代化农业, 2018(6): 29-31.
- LIU M X, MA G S, LIAN H, et al. Studies on the physiological characteristics of roots of cucumber seedlings and the control effect of bacterial wilt of *Trichoderma oxysporum* T437[J]. Modernizing Agriculture, 2018(6): 29-31.
- [14] 陈丽丽, 何玲玲, 赵雅, 等. 地衣芽孢杆菌 W10 对烟草的促生作用及机制[J]. 江苏农业科学, 2016, 45(5): 152-154.
- CHEN L L, HE L L, ZHAO Y, et al. Growth-promoting effect and mechanism of *Bacillus licheniformis* W10 on tobacco[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 45(5): 152-154.
- [15] 朱忠彬, 吴秉奇, 丁延芹, 等. 短短芽孢杆菌 DZQ3 对烟草的促生及系统抗性诱导作用[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(3): 92-96.
- ZHU Z B, WU B Q, DING Y Q, et al. The growth-promoting effect and system resistance induction of *Brevibacillus brevis* DZQ3 to tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2012, 33(3): 92-96.
- [16] 吴秉奇, 梁永江, 丁延芹, 等. 两株烟草根际拮抗菌的生防和促生效果研究[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(1): 66-71.
- WU B Q, LIANG Y J, DING Y Q, et al. Study on disease-preventing and growth-promoting effects of two antifungal bacteria from tobacco rhizosphere[J]. Chinese Tobacco Science, 2013, 34(1): 66-71.
- [17] MICHAEL O, WALTER K, BOB D, et al. Induced disease resistance in plants by chemicals [J]. European Journal of Plant Pathology, 2001, 107(1): 19-28.
- [18] 刘凤权, 王金生. 水杨酸对水稻防卫反应酶系的系统诱导[J]. 植物生理学通讯, 2002, 38(2): 121-123.
- LIU F Q, WANG J S. Systemic induction of several defense response enzymes in rice seedlings by salicylic acid[J]. Plant Physiology Communication, 2002, 38(2): 121-123.
- [19] LIANG J G, TAO R X, ZHANG X. Induction of resistance in cucumber against seedling damping-off by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) *Bacillus megaterium* strain L8[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 36(10): 6920-6927.
- [20] 张良, 刘好宝, 顾金刚, 等. 长柄木霉和泾阳链霉菌复配对烟草生长及其抗病性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2961-2969.
- ZHANG L, LIU H B, GU J G, et al. Effects of *Trichoderma longibrachitum* and *Streptomyces jingyangensis* combination on the growth and disease resistance of tobacco seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 2961-2969.
- [21] FUCHS J G. Nonpathogenic *Fusarium oxysporum* strain Fo47 induces resistance to Fusarium wilt in Tomato[J]. Plant Disease, 1997, 81(5): 492-496.

(上接第 43 页)

- [4] 姚斌, 徐建民, 尚鹤, 等. 甲磺隆污染土壤的微生物生态效应[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 557-561.
- YAO B, XU J, SHANG H, et al. Microbial ecological effects of contaminated soil with metsulfuron-methyl[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(3): 557-561.
- [5] 吴阔, 罗华元, 林昆, 等. 基于 rDNA-ITS 法鉴定的霉变烟叶真菌种类[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(6): 98-100.
- WU K, LUO H Y, LIN K, et al. Identification of mildew tobacco leaf fungi based on rDNA-ITS method[J]. Journal of Guizhou Agricultural Sciences, 2014, 42(6): 98-100.
- [6] 吴安忠, 程崖芝, 巫升鑫, 等. 烟草镰刀菌根腐病的病原鉴定[J]. 中国烟草学报, 2018, 24(2): 135-140.
- WU A Z, CHENG Y Z, WU S X, et al. Identification of tobacco fusarium root rot pathogen [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2018, 24(2): 135-140.
- [7] PHILLIPS L A, WARD V, JONES M D, et al. Ectomycorrhizal fungi contribute to soil organic matter cycling in sub-boreal forests[J]. ISME J, 2014(8): 699-713.
- [8] FLOUDAS D, BINDER M, RILEY R, et al. The paleozoic origin of enzymatic lignin decomposition reconstructed from 31 fungal genomes[J]. Science 2012, 336: 1715-1719.
- [9] 刘岳飞, 吴人敏, 张传进. 地膜对植椒土壤生物学特性和细菌多样性的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 986-993.
- LIU Y F, WU R M, ZHANG C J. Effects of plastic film on soil biological characteristics and bacterial diversity of pepper[J]. Soil Journal, 2019, 56(4): 986-993.
- [10] ANTHONY M A, FREY S D, STINSON K A, et al. Fungal community homogenization, shift in dominant trophic guild, and appearance of novel taxa with biotic invasion[J]. Ecosphere, 2017(8): 1-12.
- [11] MIAO C P, MI Q L, QIAO X G, et al. Rhizospheric fungi of Panax notoginseng: diversity and antagonism to host phytopathogens[J]. Journal of Ginseng Research, 2016, 40(2): 127-134.
- [12] LI R, SHEN Z Z, SUN L, et al. Novel soil fumigation method for suppressing cucumber Fusarium wilt disease associated with soil microflora alterations[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 101: 28-33.