杨焕焕,李茂森,王丽渊,等.生物炭对烤烟成熟期土壤养分及根际细菌群落结构的影响[J].华中农业大学学报,2021,40(5):62-71.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.009

生物炭对烤烟成熟期土壤养分及根际细菌群落结构的影响

杨焕焕[1,2],李茂森[1],王丽渊[3],
冯慧琳[1],刘福童[1],杜君[2],任天宝[1],高卫锴[4]

1.河南农业大学河南省生物炭研究工程技术中心,郑州 450002;
2.河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所/河南省农业生态与环境重点实验室,郑州 450002;
3.江西省烟草公司宜春市公司,宜春 336000; 4.广东中烟工业有限责任公司,广州 510032

摘要　采用大田小区处理方式,分别设置常规施肥(CK)和 750 kg/hm^{2}生物炭+常规施肥(T)2 组试验,探究生物炭对植烟土壤微生物群落和土壤养分的变化规律及其对烟叶质量的影响。结果显示:生物炭可以显著提高土壤 pH、速效磷、速效钾和有机碳含量,促进烟株生长发育;与 CK 相比,生物炭处理后绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteriota)和厚壁菌门(Firmicutes)丰度增加,分别提高了 1.82%、12.36%和 64.55%;放线菌门(Actinobacteriota)和变形菌门(Proteobacteria)丰度分别降低了 2.02%和 9.00%;聚类和主成分分析结果显示,烤烟根际土壤中优势细菌与土壤 pH、速效钾、速效磷和有机碳均存在显著的相关关系,其中厚壁菌门(Firmicutes)、Myxococcota 和 Desulfobacterota 与土壤 pH、速效磷、速效钾和有机碳存在显著的正相关关系($P<0.05$),Bacterdidota 与 Patescibacteria 与土壤 pH、速效钾、速效磷和有机碳存在显著负相关关系;生物炭施用通过改善根系周围矿质营养和微生物群落进而提高烟叶质量。生物炭有利于成熟期土壤养分固持及根际促生细菌群落增加。

关键词　生物炭;烤烟;植烟土壤;细菌;群落结构

中图分类号　S 572;S 154.3　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1000-2421(2021)05-0062-10

植烟土壤的质量直接决定了烟叶的质量[1-2]。近些年来,由于大量化肥和农药的施用,土壤养分失衡、次生盐渍化和酸化现象严重,病原菌不断积累,土壤质量和生态环境不断恶化,烤烟成熟期的耐熟性和成熟度受到了很大的影响,造成烟叶品质下降,这些问题给烟草的可持续发展带来了极大的挑战[3]。土壤微生物是土壤物质循环和能量流动的参与者和驱动者,在土壤环境中具有重要地位[4],其对土壤环境具有极强的敏感性,可以作为评价人为干扰土壤质量变化的指标之一[5]。

生物炭是生物质在低氧条件下,经高温裂解产生的一种性质稳定的富碳物质[6]。生物炭表面孔隙丰富,有极大的电荷密度和比表面积,生物炭富含活性基团,具有较强的阳离子交换能力,在土壤修复领域发挥着重要的作用[7-9]。生物炭在自然条件下呈碱性,施入土壤后可以提高酸性土壤 pH。冯慧琳等[10]研究了生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制,生物炭施用后土壤容重降低,pH 值、速效磷、速效钾、有机质含量和碳氮比均升高,且细菌多样性显著提升,尤其是增加了芽单胞菌门和变形菌门等促生菌的丰度。阎海涛等[11]研究发现施加生物炭 3 a 后显著提高了土壤 pH、含水率、总有机碳(TOC)和总氮(TN)含量,而降低了土壤容重和溶解性有机碳(DOC)含量。曲晶晶等[12]研究发现,在土壤中施加秸秆炭可以提高土壤 pH 和团聚体数量,并且环境因子的改变驱动土壤微生物群落的生态演替。生物炭通过改变土壤的理化性质,增加活性炭源和改善土壤水分环境,从而影响土壤

收稿日期:2021-03-03
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0200808);南平市烟草公司重点科技攻关项目(南烟司叶[2017]21 号);广东中烟工业有限责任公司科技攻关项目(2020440000340029);河南省教育厅青年骨干教师资助项目(2020GGJS047)
杨焕焕,E-mail:13253375996@163.com
通信作者:任天宝,E-mail:biochar2018@henau.edu.cn; 高卫锴,E-mail:gwk032@qq.com

微生物的群落结构[13-14]。在土壤中添加生物炭能显著改变微生物的丰度和群落结构[15]，随着生物炭施用量的增加，土壤中各类微生物的丰度和群落结构均显著提高[16-18]，生物炭施加到土壤后可以在短期内富集微生物类群[19]。

烤烟成熟期是影响烟叶质量的关键时期，因此，探究生物炭对烤烟成熟期烟株根际土壤细菌群落结构和土壤养分变化规律对优质烟叶生产具有重要的意义。本试验在江西宜春烟区进行，在植烟土壤中添加生物炭，采用高通量技术分析了土壤细菌群落结构和土壤养分变化规律，以期为烤烟土壤微生态的调控和我国优质烟叶生产提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验于 2020 年在江西宜春上高烟区进行，该烟区为烟稻轮作，植烟土壤均为砂壤土。土壤基本理化性质为：土壤 pH 值 5.52，全碳、全氮、全硫含量分别为 1.37%、0.17%、0.073%，有机质含量为2.31%，碱解氮为 97.25 mg/kg，土壤速效磷为 25.54 mg/kg，土壤速效钾 105.40 mg/kg。生物炭原料为花生壳，理化性质为：比表面积（按过 0.85 mm 孔径筛计）16.71 m^2/g，容重 0.21 g/cm^3，pH 9.05，含碳 465.3 g/kg，全氮 8.30 g/kg，全硫 0.83 g/kg，孔体积 0.029 m^2/g。

1.2　试验设计

试验采用随机区组设计，共设置 2 组处理，每组处理设 3 次重复，小区长 20 m，宽 10 m。CK：常规施肥（纯氮为 145.0 kg/hm^2，$m_{(N)}:m_{(P_2O_5)}:m_{(K_2O)}=1:1:3$），T：750 kg/hm^2 生物炭＋常规施肥。4 月 23 日之前将生物炭施入烟田，生物炭料和常规肥作为基肥一次性施入植烟土壤，施肥方式为条施。各处理的移栽方法、水肥管理、农事操作与非试验田管理一致。

1.3　供试土壤与样品采集

烤烟生长到成熟期第 75 天时，根据 5 点取样法确定取样点，每个处理取 5 株烟株根际土壤，收集完成后混匀，一部分保存在 10 mL 无菌离心管中，干冰保存，用于进行微生物多样性检测，一部分于 −4 ℃冰箱保存，用于土壤微生物量的检测。最后一部分在阴凉处自然风干后研磨，分别过 0.85、0.25 和 0.15 mm 筛后于阴凉处保存，进行土壤理化性质分析。

1.4　土壤理化指标及养分测定

参照文献[20]测定土壤理化性质，对样点做平行组。pH 的测定采用超纯水做浸提剂，按照土水质量比 1∶2.5 浸提，用精密 pH 计（型号：IS128C）测定；采用火焰光度计法测定土壤速效钾；土壤有机碳采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定；土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提法测定；土壤全碳、全氮、全硫含量采用碳氮硫元素分析仪（Vario MAX CNS，德国）测定；碱解氮采用碱解扩散法；微生物量碳氮（MBC、MBN）采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定[10]。

1.5　烟叶化学成分测定

烟叶常规化学成分（总氮、烟碱、蛋白质、总糖、还原糖、钾、氯）采用流动分析仪（AutoAnalyzer3）测定，分别参照 YC/T 161—2002《烟草及烟草制品总氮的测定》、YC/T 160—2002《烟草及烟草制品总植物碱的测定》、YC/T 249—2008《烟草及烟草制品蛋白质的测定》、YC/T 159—2002《烟草及烟草制品水溶性糖的测定》、YC/T 217—2007《烟草及烟草制品钾的测定》和 YC/T 162—2002《烟草及烟草制品氯的测定进行》。

1.6　土壤微生物检测

使用 E.Z.N.A.© soil 试剂盒（OMEGA）提取土壤 DNA，利用 NanoDrop2000 超微量分光光度计（Thermo Fisher Scientific 公司）检测 DNA 纯度；检测合格后，用用 338F 和 806R 引物进行扩增[21-22]。

使用琼脂糖回收盒回收 PCR 产物，混合后送往 IlluminaMiSeq 平台平台进行基因序列测定（上海美吉生物医药科技有限公司）。

1.7　数据分析

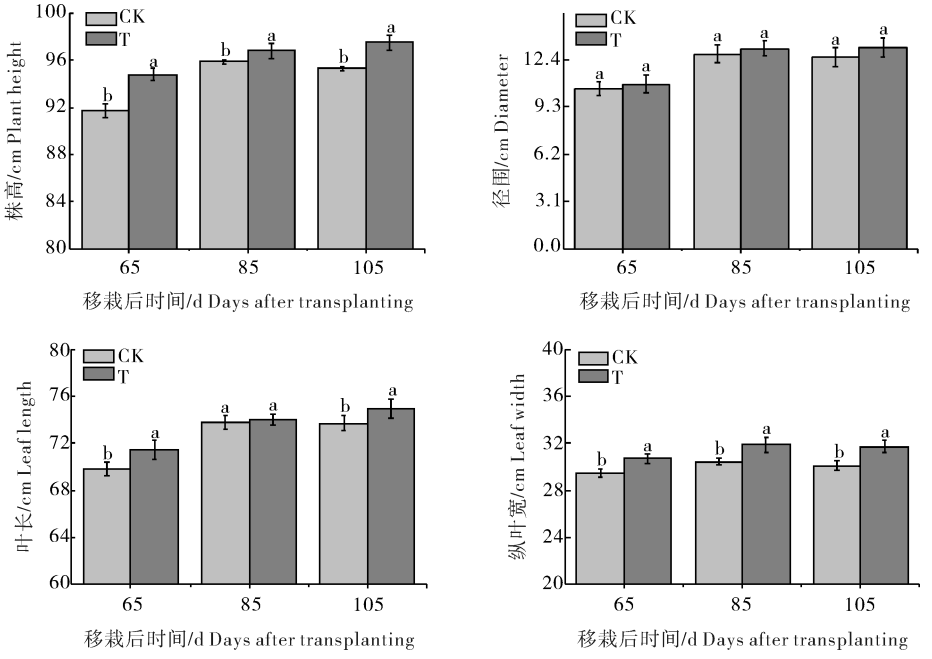
使用 Excel 2016 整理数据，方差分析采用最小显著性差异法以 SPSS 22.0 软件分析处理数据，用 R 软件的 vegan 包进行绘图。

2　结果与分析

2.1　生物炭对烤烟农艺性状的影响

如图 1 所示，添加生物炭后烟株株高和中部叶叶宽在移栽后 65、85、105 d 均大于对照处理，且均达到显著性差异，株高在 3 个时期分别提高了

3.27%、0.42%和0.63%，生物炭处理烟株中部叶叶宽较对照分别提高了4.15%、4.96%和5.13%。添加生物炭处理茎围与对照组相比无显著提高。生物炭处理在移栽后65 d和105 d中部叶叶长较对照分别显著提高了2.12%和1.96%，表明施加生物炭有利于促进烟株生长。



不同小写字母表示在0.05水平存在显著性差异。Different letter means significantly different at 0.05 probability level.

图1 生物炭对烟株不同生育期农艺性状的影响

Fig.1 Effects of biochar on agronomic traits of tobacco at different growth stages

2.2 生物炭对土壤主要营养指标的影响

试验结果(表1)显示，与CK相比，施加生物炭的土壤pH显著提高了9.48%，土壤碱解氮含量提高了10.11%，但与CK没有显著差异；施加生物炭处理土壤速效钾、速效磷和有机碳含量较CK分别提高了11.14%、7.90%和11.76%，均与CK存在显著差异。说明添加有机碳可以显著提高土壤pH和养分含量。

表1 不同处理土壤化学性质

Table 1 Soil chemical properties of different treatments

处理 Treatment	pH	碱解氮/(mg/kg) Alkali-hydrolyzed nitrogen	速效钾/(mg/kg) Available potassium	速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	有机碳/(g/kg) Organic carbon
CK	5.59±0.17b	62.97±6.03a	150.14±23.32b	89.35±3.48b	12.42±1.03b
T	6.11±0.03a	69.33±7.15a	166.86±22.97a	96.41±7.99a	13.88±0.54a

2.3 生物炭对土壤细菌多样性的影响

1)生物炭对根际土壤细菌α多样性的影响。对10个土壤样本进行细菌检测(图2)，共获得有效序列573 285条。样品测序覆盖度为98.11%，测序数据量合理。依据97%序列相似性对所测序列进行聚类分析，10个样本产生2 459～3 002个OTU，样本平均OTU数为2 860.5。施肥与对照处理共有OTU数3 842，与CK相比，施加生物炭处理处理土壤OUT数提高了2.28%。

对土壤细菌多样性指数(表2)进行分析，CK和T的Shannon指数分别是6.52和6.60，施加生物炭处理ACE指数和Chao指数高于CK处理，表明施加生物炭对土壤微生物群落有一定影响。

2)生物炭对根际土壤细菌群落组成的影响。细菌群落组成测定结果表明，所有样本中门水平上共获得细菌群落44个。如图3所示，丰度较高的门种类分别为放线菌门(Actinobacteriota)、变形菌门(Proteobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteriota)和厚壁菌门(Firmicutes)，相对丰度分别为26.41%～32.43%、22.32%～34.62%、

7.86%～15.18%、6.08%～13.99%和 3.07%～7.85%，平均相对丰度分别为 29.39%、26.65%、12.76%、11.43%和 4.37%。其中优势菌为放线菌门、变形菌门、绿弯菌门和酸杆菌门，其相对丰度之和占所有可注释菌的 84.58%以上。

生物炭对不同门细菌丰度的影响不同。对施加生物炭处理和对照土壤样品中细菌群落的相对丰度进行 t 检验，结果(图 4)显示，与 CK 相比，生物炭处理的绿弯菌门(Chloroflexi)、酸杆菌门(Acidobacteriota)和厚壁菌门(Firmicutes)丰度分别提高了 1.82%、12.36%和 64.55%；放线菌门(Actinobacteriota)和变形菌门(Proteobacteria)丰度分别降低了 2.02%和 9.00%。此外，在非优势种群中，Myxococcota 和 Desulfobacterota 丰度与对照相比有显著提高($P<0.05$)，而 Bacteroidota 和 Patescibacteria 丰度与对照相比显著降低($P<0.05$)。

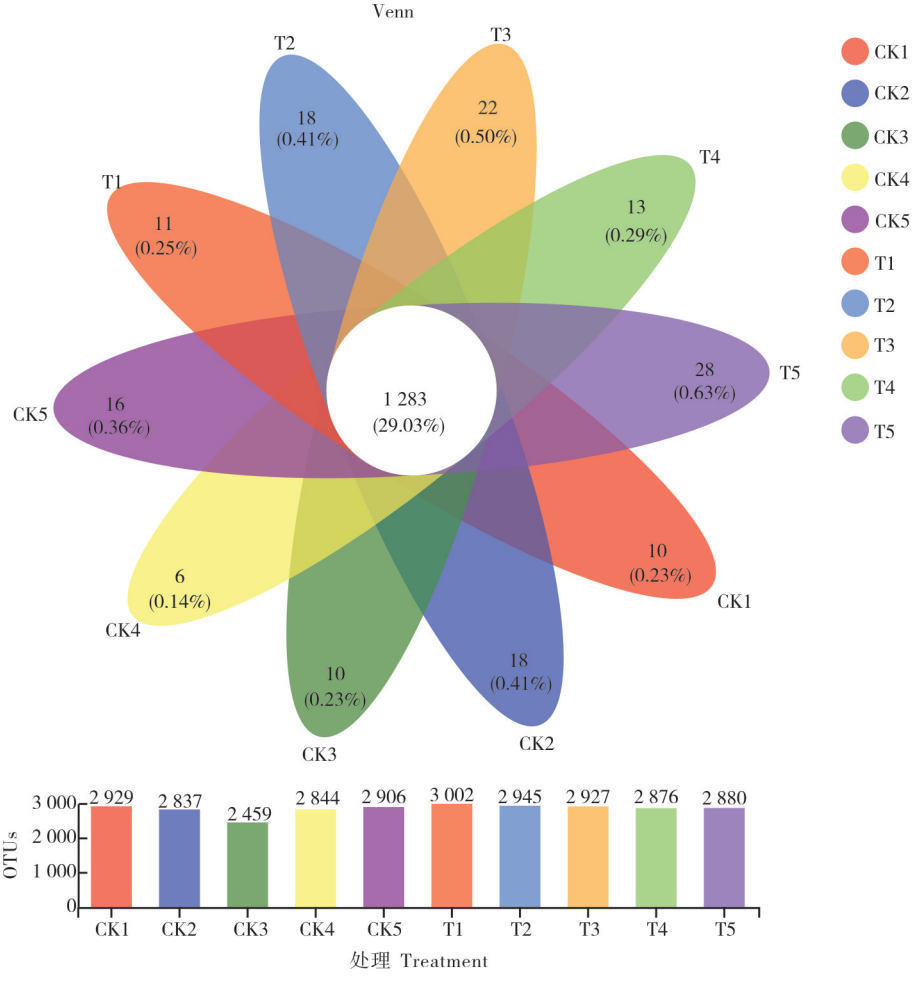


图 2　所有样品细菌群落 OTUs

Fig.2　OTUs numbers of bacterial and fungal communities in all samples

表 2　细菌群落测序数据和 α 多样性

Table 2　Sequencing data and α diversity of the bacterial community

处理 Treatment	序列数 Sequence number	OTUs	Shannon 指数 Shannon index	ACE 指数 ACE index	Chao 指数 Chao index	Simpson 指数 Simpson index	覆盖度/% Coverage
CK	54 700	4 084	6.52	3 573.33	3 554.30	0.005 2	98.06
T	60 371	4 177	6.60	3 647.56	3 622.68	0.004 0	98.16

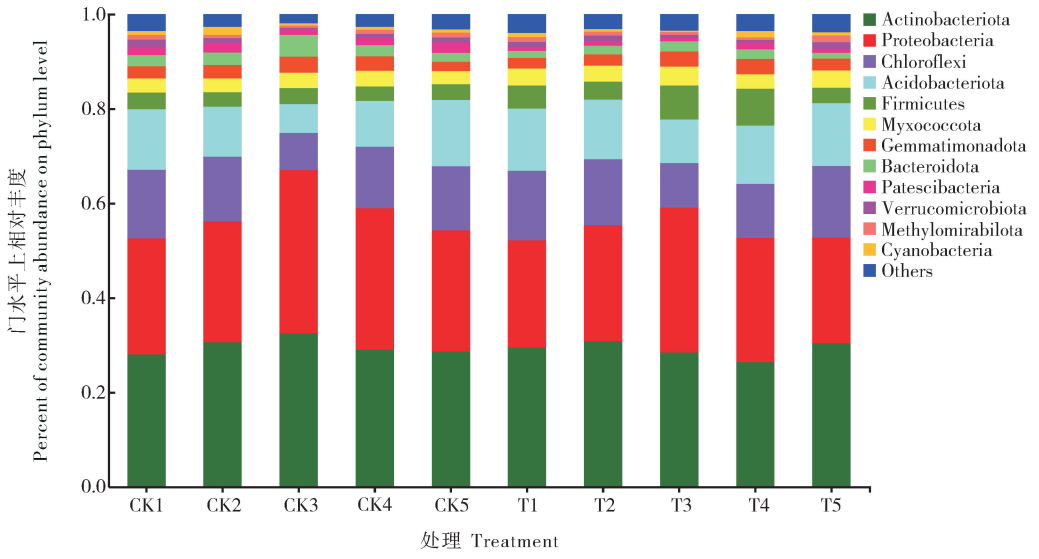


图3 所有样本中细菌门水平上的物种相对丰度

Fig.3 Relative abundance of species at phylum level in all samples

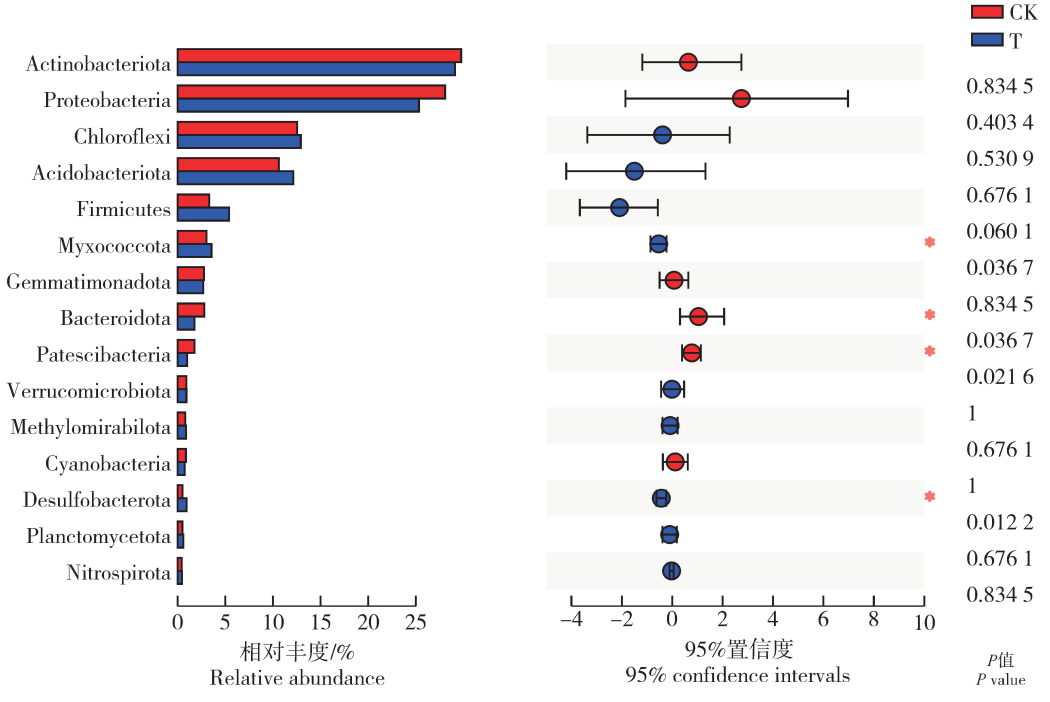
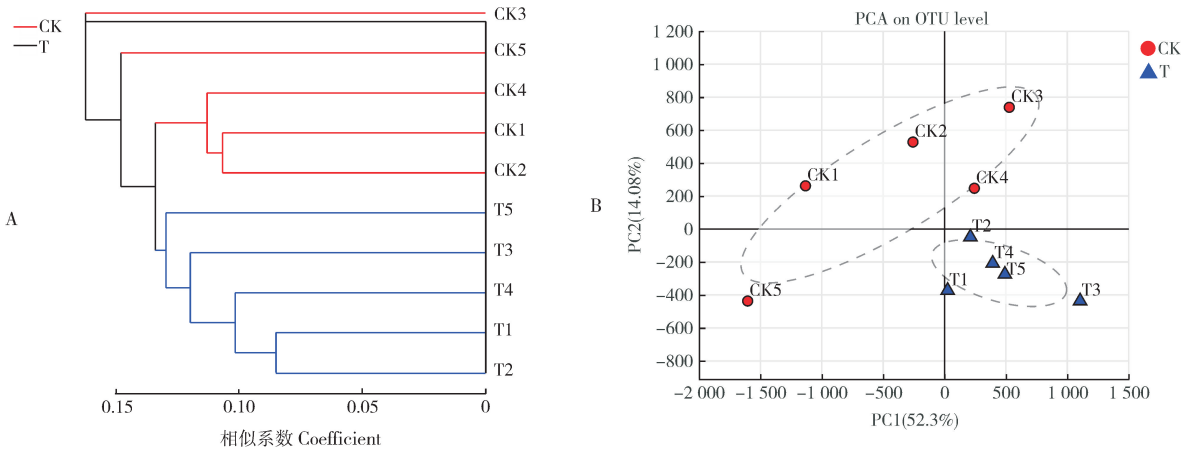


图4 不同处理组门水平上优势细菌相对丰度

Fig.4 Relative abundance of dominant bacteria at phylum level in different treatment groups

3)生物炭对根际土壤微生物β多样性的影响。对样本距离矩阵进行聚类分析,构建样本层级聚类树,可以准确表述不同样本的相似性和差异关系。从图5A可以看出,与对照相比,施加生物炭的样本可以完全聚类在一起,且与对照相隔较远,表明根际微生物区系在朝一定的方向发生变化,施加生物炭能够显著改变烟株根系微生物区系结构。基于OTUs丰度的土壤菌落结构主成分分析结果如图5B所示,PC1轴和PC2轴对样本组成差异的贡献值分别为52.30%和14.08%,从图5B可以看出,施加生物炭的处理与对照处理样本点在PC1轴上有较明显的分离,说明生物炭对土壤细菌群落结构产生了一定的影响。



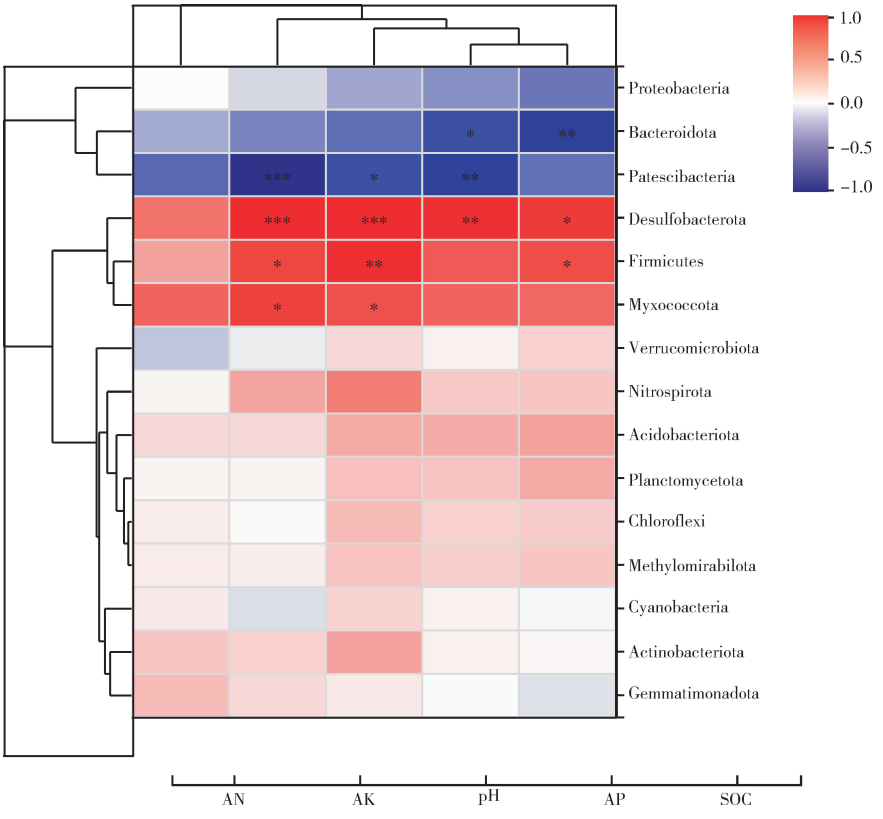
A：层级聚类树 Hierarchical clustering tree on OTU level；B：主成分分析 Principal component analysis.

图 5　生物炭施用对烤烟根际土壤细菌 β 多样性

Fig.5　Effects of biochar on diversity of soil bacterial beta

2.4　土壤细菌群落结构与土壤化学性质相关性分析

相关性分析结果(图 6)表明，厚壁菌门(Firmicutes)相对丰度与土壤速效钾、pH 和有机碳呈显著正相关($P<0.05$)，Myxococcota 相对丰度与速效钾和 pH 呈显著正相关，Bacteroidota 相对丰度与速效磷和有机碳呈显著负相关，Patescibacteria 相对丰度与速效钾、速效磷和 pH 呈显著负相关，Desulfobacterota 相对丰度与土壤速效钾、速效磷和 pH 呈极显著正相关关系，与有机碳呈显著正相关关系。结果表明，土壤化学性质大多与土壤细菌优势门类有显著相关关系。



AN：碱解氮 Alkali-hydro lyzed nitrogen；AK：速效钾 Available potassium；AP：速效磷 Arailable phosphorus；SOC：有机碳 Soil organic carbon.

图 6　细菌优势门类和土壤化学性质之间的相关性关系

Fig.6　Correlation between dominant bacteria and soil chemical properties

2.5 施加生物炭对烟叶化学成分的影响

比较分析各个处理 B2F 等级烤后烟叶的化学成分，由表 3 可知，生物炭处理的烟叶总糖含量、还原糖含量、钾含量较对照处理均有显著增加，分别增加了 16.4%、10.82%和 11.78%；烟碱含量、总氮含量和蛋白质含量较常规处理相比有所增加，但差异未达显著水平。另外，烟叶中氯含量显著降低4.47%。结果表明，生物炭施用有利于改善烟叶质量，协调烟叶化学成分。

表 3 生物炭施用对烤后烟化学成分的影响

Table 3 Effects of biochar on conventional chemical components of flue-cured tobacco g/kg

处理 Treatment	总糖 Total sugar	还原糖 Reducing sugar	烟碱 Nicotine	钾 Potassium	氯 Chlorine	总氮 Total nitrogen	蛋白质 Protein
CK	191.67±26.83b	173.35±18.72b	32.43±0.32ab	23.42±0.29b	2.91±0.39a	22.78±0.89b	11.23±0.93ab
T	223.24±30.42a	192.11±21.25a	33.29±0.41a	26.18±0.37a	2.78±0.27ab	23.29±0.63ab	11.47±0.85a

3 讨 论

3.1 生物炭对土壤养分的影响

添加生物炭可以改善土壤的养分状况，促进植物生长，提高作物产量[23]。本试验结果表明，与对照相比，施加生物炭显著提高了土壤的 pH，这是由于生物炭在自然条件下呈碱性，pH 值一般为 7.0～10.5[24]，施加到土壤中后可以增加土壤的 pH，使烟株在适宜的 pH 条件下生长发育。氮素是影响植株生长发育的关键元素，直接决定了作物的产量。余其昌等[25]研究发现，生物炭与菜籽饼配施可以有效增加烤后烟叶的氮含量，其中以生物炭 750 kg/hm^2＋菜籽饼 1 500 kg/hm^{2}处理效果最佳；Steiner 等[26]研究发现，在土壤中施入生物炭可以显著提高水稻、高粱的产量；邓霞[27]在玉米、黄瓜地块中施加生物炭，显著提高了玉米和黄瓜的干质量。施加生物炭能有效提高土壤的持水能力，提升土壤氮的固持能力[28]，可以降低氮素的淋失作用[29]。

本研究发现，施加生物炭可以显著提高土壤速效磷含量，与刘卉等[30]试验结果一致，这可能是生物炭影响了土壤微生物的活性，促进了微生物对磷素的溶解和矿化效率，进而提高土壤中的速效磷含量[31-32]。本研究中施加生物炭显著提高了土壤速效钾和有机质含量，有机碳能够降低土壤的固钾能力，从而提高土壤中钾元素的有效性，施加生物炭可以提高土壤温度，加速土壤中缓效钾的释放，提升速效钾含量[33]。

3.2 生物炭对土壤细菌多样性及烟叶质量的影响

生物炭独特的多孔结构为土壤中的微生物提供了良好的环境，促进微生物的生长发育[34]。与常规施肥相比，施加生物炭肥改变了放线菌门（Actinobacteriota）、变形菌门（Proteobacteria）、绿弯菌门（Chloroflexi）、酸杆菌门（Acidobacteriota）、厚壁菌门（Firmicutes）、Myxococcota 和 Desulfobacterota 等的相对丰度。说明生物炭显著影响了细菌群落结构。施加生物炭后，土壤酸杆菌门（Acidobacteriota）和厚壁菌门（Firmicutes）丰度有明显的增加，这可能是因为生物炭的多孔性为细菌在土壤中生长及繁殖提供了更大的空间，从而增加了细菌的数量，同时还调节了土壤环境的物理和化学性质，影响土壤微生物生长、发育和代谢[35]。聚类树图和 PCA 分析结果表明，生物炭可以促使土壤微生物结构向特定的方向发展，这与任天宝等[36]的研究结果一致。相关性分析表明，土壤中优势细菌与土壤 pH、速效钾、速效磷和有机碳均存在一定的相关关系，其中厚壁菌门（Firmicutes）、Myxococcota 和 Desulfobacterota 与土壤 pH、速效磷、速效钾和有机碳存在显著的正相关关系（$P<0.05$），Bacterdidota 与 Patescibacteria 与土壤 pH、速效钾、速效磷和有机碳存在显著的负相关关系。施加生物炭有利于成熟期土壤养分固持，并驱动根际促生细菌群落增加，进而改善烟株根际矿质营养和微生物群落结构，促进营养的吸收和烟株的生长发育及代谢，进而提高烟叶产量，这与冯慧琳等[10]生物炭对烤烟根际细菌群落的影响及其作用机制研究结果相一致。

综上，生物炭可以改善土壤的化学性质，显著提高土壤 pH、速效磷、速效钾和有机碳含量。生物炭对土壤养分的改变，促进了土壤细菌群落的变化，提高了功能微生物如土壤酸杆菌门（Acidobacteriota）和厚壁菌门（Firmicutes）的丰度。本研究结果表明，pH 是影响细菌群落结构的关键因子之一。土

壤微生态环境在作物的生长发育中起着重要的作用，施加生物炭对有利于改善烤烟成熟期土壤养分和根际细菌群落结构。

参考文献 References

[1] 阎海涛，殷全玉，任天宝，等. 植烟土壤微生态调控技术途径及发展趋势[J]. 河南农业科学，2017，46(10)：1-7. YAN H T，YIN Q Y，REN T B，et al. Status and prospect of micro-ecology regulating approaches of tobacco-planted soil[J]. Journal of Henan agricultural sciences，2017，46(10)：1-7(in Chinese with English abstract).

[2] 穆青，刘洋，展彬华，等. 我国植烟土壤主要问题及其防控措施研究进展[J]. 江苏农业科学，2018，46(21)：16-20. MU Q，LIU Y，ZHAN B H，et al. The main problems of tobacco planting soil and the research progress of its prevention and control measures in China[J]. Jiansu agricultural sciences，2018，46(21)：16-20(in Chinese).

[3] 李雪利，叶协锋，顾建国，等. 土壤 C/N 比对烤烟碳氮代谢关键酶活性和烟叶品质影响的研究[J]. 中国烟草学报，2011，17(3)：32-36. LI X L，YE X F，GU J G，et al. Effect of soil C/N ratio on activity of key enzymes involved in carbon and nitrogen metabolism and quality of flue-cured tobacco leaves[J]. Acta tabacaria sinica，2011，17(3)：32-36(in Chinese with English abstract).

[4] 杨甲华，余佳玲. 烟草连作障碍因子及其解决途径研究进展[J]. 湖南农业科学，2016(8)：113-116. YANG J H，YU J L. Advance in obstruction factor and solution ways of tobacco continuous cropping[J]. Hunan agricultural sciences，2016(8)：113-116(in Chinese with English abstract).

[5] WELBAUM G E，STURZ A V，DONG Z M，et al. Managing soil microorganisms to improve productivity of agro-ecosystems[J]. Critical reviews in plant sciences，2004，23(2)：175-193.

[6] LIU L，SHEN G，SUN M X，et al. Effect of biochar on nitrous oxide emission and its potential mechanisms[J]. Journal of the air & waste management association，2014，64(8)：894-902.

[7] 孔丝纺，姚兴成，张江勇，等. 生物炭的特性及其应用的研究进展[J]. 生态环境学报，2015，24(4)：716-723. KONG S F，YAO X C，ZHANG J Y，et al. Review of characteristics of biochar and research progress of its applications[J]. Ecology and environmental sciences，2015，24(4)：716-723(in Chinese with English abstract).

[8] KONG L，GAO Y，ZHOU Q X，et al. Biochar accelerates PAHs biodegradation in petroleum-polluted soil by biostimulation strategy[J]. Journal of hazardous materials，2018，343：276-284.

[9] REYES-CABRERA J，LEON R G，ERICKSON J E，et al. Differences in biomass and water dynamics between a cotton-peanut rotation and a sweet sorghum bioenergy crop with and without biochar and vinasse as soil amendments[J]. Field crops research，2017，214：123-130.

[10] 冯慧琳，徐辰生，何欢辉，等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学，2021，42(1)：422-432. FENG H L，XU C S，HE H H，et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & bacterial community and its mechanism[J]. Environmental science，2021，42(1)：422-432(in Chinese with English abstract).

[11] 阎海涛，殷全玉，丁松爽，等. 生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响[J]. 环境科学，2018，39(5)：2412-2419. YAN H T，YIN Q Y，DING S S，et al. Effect of biochar amendment on physicochemical properties and fungal community structures of cinnamon soil[J]. Environmental science，2018，39(5)：2412-2419(in Chinese with English abstract).

[12] 曲晶晶，郑金伟，郑聚锋，等. 小麦秸秆生物炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J]. 生态与农村环境学报，2012，28(3)：288-293. QU J J，ZHENG J W，ZHENG J F，et al. Effects of wheat-straw-based biochar on yield of rice and nitrogen use efficiency of late rice[J]. Journal of ecology and rural environment，2012，28(3)：288-293(in Chinese with English abstract).

[13] KOLTON M，MELLER H Y，PASTERNAK Z，et al. Impact of biochar application to soil on the root-associated bacterial community structure of fully developed greenhouse pepper plants[J/OL]. Applied and environmental microbiology，2011，77：14[2021-03-03]. https://journals.asm.org/doi/10.1128/AEM.00148-11.

[14] SIMARANI K，HALMI M F A，ABDULLAH R. Short-term effects of biochar amendment on soil microbial community in humid tropics[J]. Archives of agronomy and soil science，2018，64(13)：1847-1860.

[15] 常栋，马文辉，张凯，等. 生物炭基肥对植烟土壤微生物功能多样性的影响[J]. 中国烟草学报，2018，24(6)：58-66. CHANG D，MA W H，ZHANG K，et al. Effect of biochar fertilizer on microbial functional diversity in tobacco growing soil[J]. Acta tabacaria sinica，2018，24(6)：58-66(in Chinese with English abstract).

[16] AGYARKO-MINTAH E，COWIE A，ZWIETEN L V，et al. Biochar lowers ammonia emission and improves nitrogen retention in poultry litter composting[J]. Waste management，2016，61：129-137.

[17] 陈心想，耿增超，王森，等. 施用生物炭后塿土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. 农业环境科学学报，2014，33(4)：751-758. CHEN X X，GEN Z C，WANG S，et al. Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil[J]. Journal of agro-environment science，2014，33(4)：751-758(in Chinese with English abstract).

[18] ANDERSON C R，HAMONTS K，CLOUGH T J，et al. Biochar does not affect soil N-transformations or microbial community structure under ruminant urine patches but does alter

relative proportions of nitrogen cycling bacteria[J]. Agriculture,ecosystems and environment,2014,191,15:63-72.

[19] HU L,CAO L X,ZHANG R D. Bacterial and fungal taxon changes in soil microbial community composition induced by short-term biochar amendment in red oxidized loam soil[J]. World journal of microbiology and biotechnology,2014,30(3):1085-1092.

[20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学出版社,1999. LU R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing:China Agricultural Science Press,1999(in Chinese).

[21] HUANG A H,LI J W,SHEN Z Q,et al. High-throughput identification of clinical pathogenic fungi by hybridization to an oligonucleotide microarray[J]. Journal of clinical microbiology,2006,44(9):3299-305.

[22] ROUSK J,BÅÅTH E,BROOKES P C,et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil[J]. The ISME journal,2010,4(10):1340-1351.

[23] 邹健,彭云,王娜,等. 生物炭用量对烤烟生长及产量、质量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版),2017,32(4):652-658.ZOU J,PENG Y,WANG N,et al. Effect of biochar application amount on growth,yield and quality of flue-cured tobacco plants[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(natural science edition),2017,32(4):652-658(in Chinese with English abstract).

[24] 李佳轶,刘文,任天宝,等. 植烟土壤物理特性及碳库对不同粒径生物炭的动态响应[J]. 中国土壤与肥料,2019(2):14-23.LI J Y,LIU W,REN T B,et al. Dynamic response of tobacco planting soil physical properties and carbon pool to different biochar particle sizes[J]. Soil and fertilizer sciences in China,2019(2):14-23(in Chinese with English abstract).

[25] 余其昌,扈强,金保锋,等. 生物炭与菜籽饼不同配比对土壤养分及烤烟产质量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2018,33(3):513-519.YU Q C,HU Q,JIN B F,et al. Effects of different biochar and rapeseed cake ratios on the soil nutrient,yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(natural science edition),2018,33(3):513-519(in Chinese with English abstract).

[26] STEINER C,TEIXEIRA W G,LEHMANN J,et al. Long term effects of manure,charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central Amazonian upland soil[J]. Plant and soil,2007,291(1/2):275-290.

[27] 邓霞. 湿地植物生物炭的制备及其对土壤氮素生物有效性的影响[D].青岛:中国海洋大学,2012.DENG X. Effects of reed biochar on nitrogen bioavailability in the agricultural soil[D]. Qingdao:Ocean University of China,2012(in Chinese with English abstract).

[28] 林婉嫔. 不同热解温度茶渣生物炭对土壤氮素固持转化的影响研究[D]. 成都:四川农业大学,2019.LIN W P. Effects of tea residue biochar produced by different pyrolysis temperatures on retention and transformation of soil nitrogen[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University,2019(in Chinese with English abstract).

[29] 周志红,李心清,邢英,等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境,2011,39(2):278-284.ZHOU Z H,LI X Q,XING Y,et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil[J]. Earth and environment,2011,39(2):278-284(in Chinese with English abstract).

[30] 刘卉,周清明,黎娟,等. 生物炭对植烟土壤养分的影响[J]. 中国农业科技导报,2016,18(3):150-155.LIU H,ZHOU M Q,LI J,et al. Effects of biochar on the nutrients of planting tobacco soil[J]. Journal of agricultural science and technology,2016,18(3):150-155(in Chinese with English abstract).

[31] 郎印海,王慧,刘伟.柚皮生物炭对土壤中磷吸附能力的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(4):78-84.LANG Y H,WANG H,LIU W. Effect of pomelo peel biochars on adsorption performance of phosphorus in soil[J]. Periodical of Ocean University of China(natural science edittion),2015,45(4):78-84(in Chinese with English abstract).

[32] 王宁,焦晓燕,武爱莲,等. 生物炭对土壤磷、钾养分影响研究进展[J]. 山西农业科学,2016,44(9):1402-1405,1420.WANG N,JIAO X Y,WU A L,et al. Research advances on effects of biochar application on soil phosphorus and potassium[J]. Journal of Shanxi agricultural sciences,2016,44(9):1402-1405,1420(in Chinese with English abstract).

[33] 尧芳,任天宝,徐敏,等. 生物质炭改善土壤矿质营养吸收的研究进展及作用机制分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(10):46-51.YAO F,REN T B,XU M,et al. Research progress and mechanism of biomass carbon improving soil mineral nutrient absorption[J]. Jiangsu agricultural sciences,2020,48(10):46-51(in Chinese with English abstract).

[34] 张功臣,赵征宇,王波,等. 生物炭和微生物菌剂配施对设施土壤理化特性及黄瓜产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(18):155-159. ZHANG G C,ZHAO Z Y,WANG B,et al. Effects of combined application of biochar and microbial agents on physical and chemical characteristics of greenhouse soil and yield and quality of cucumber[J]. Jiangsu agricultural sciences,2019,47(18):155-159(in Chinese with English abstract).

[35] 黄连喜,魏岚,李衍亮,等. 花生壳生物炭对土壤改良、蔬菜增产及其持续效应研究[J]. 中国土壤与肥料,2018(1):101-107.HUANG L X,WEI L,LI Y L,et al. Study on soil quality improvement,vegetable yield increasing of peanut shell biochar and its residual effect[J]. Soil and fertilizer sciences in China,2018(1):101-107(in Chinese with English abstract).

[36] 任天宝,杨艳东,高卫锴,等. 基于高通量测序的生物炭施用量对植烟土壤细菌群落的影响[J]. 河南农业科学,2018,47(12):64-69.REN T B,YANG Y D,GAO W K,et al. Effects of

application amount of biochar on soil bacterial community in tobacco fields based on high-throughput sequencing[J]. Journal of Henan agricultural sciences, 2018, 47(12): 64-69(in Chinese with English abstract).

Effects of biochar on soil nutrients and rhizosphere bacterial community structure of flue-cured tobacco at maturity stage

YANG Huanhuan[1,2], LI Maosen[1], WANG Liyuan[3], FENG Huilin[1], LIU Futong[1], DU Jun[2], REN Tianbao[1], GAO Weikai[4]

1. *Henan Biochar Technology Engineering Laboratory, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450002, *China*;
2. *Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences/Henan Key Laboratory of Agricultural Eco-environment, Zhengzhou* 450002, *China*;
3. *Yichun Branch of Jiangxi Tobacco Company, Yichun* 336000, *China*;
4. *Guangdong China Tobacco Industry Co., Ltd., Guangzhou* 510032, *China*

Abstract Field plot treatment and two groups of experiments including CK (conventional fertilization) and T (750 kg/hm^2 biochar + conventional fertilization) were used to study the effects of biochar on soil nutrients and rhizosphere bacterial community structure of flue-cured tobacco at maturity stage. The results showed that biochar significantly increased soil pH, the content of available phosphorus, available potassium and organic carbon, and promoted the growth and development of tobacco plants. Compared with CK, the abundance of Chloroflexi, Acidobacteria and Firmicutes increased by 1.82%, 12.36% and 64.55%, respectively. The abundance of Actinobacteria and Proteobacteria decreased by 2.02%, and 9.00%, respectively. The results of cluster and principal component analyses showed that the dominant bacteria were significantly correlated with the soil pH, available potassium, available phosphorus and organic carbon. The Firmicutes, Myxococcota and Desulfobacterota were significantly positively correlated with soil pH, available phosphorus, available potassium and organic carbon ($P<0.05$). The Bacterdidota and Patescibacteria were negatively correlated with soil pH, available potassium, available phosphorus and organic carbon. Biochar application can improve the quality of tobacco leaves by improving the mineral nutrition and microbial community around the roots. Biochar is conducive to soil nutrient retention and growth-promoting bacterial communities in the rhizosphere during the maturity period of tobacco. It will provide a theoretical reference for regulating soil nutrition and microecological environment during tobacco maturity.

Keywords biochar; flue-cured tobacco; tobacco-growing soil; bacteria; community structure

（责任编辑：张志钰）