陈传杰,梁晓艳,柳艳平,等.生物炭通过改变根际微环境缓解棕壤酸化[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(6):138-150.
Chen C J, Liang X Y, Liu Y P, et al. Biochar alleviates brown soil acidification by altering the rhizosphere microenvironment [J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(6):138-150.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202508028

生物炭通过改变根际微环境缓解棕壤酸化

陈传杰[1,2],梁晓艳[1,2],柳艳平[3],李萌[1,2],张海洋[1,2],李东阳[1,2],顾寅钰[1,2*],刘兆辉[4*]

(1.山东省农业科学院 山东省蚕业研究所,山东 烟台 264002;2.功能作物种质创新与栽培利用山东省工程研究中心,山东 烟台 264002;3.烟台市固定资产投资项目评审中心 烟台市工程咨询院,山东 烟台 264000;4.山东省农业科学院 资源与环境研究所,山东 济南 250100)

摘　要:[目的]探究苹果木生物炭对酸化棕壤的改良效果及其通过调节土壤化学性质和细菌群落促进花生生长的作用机制。[方法]采用盆栽试验,设置5个生物炭梯度(0、7.5、15、45、75 t/hm^2),测定土壤化学性质(pH、有机质、交换性酸等)和花生农艺性状、根系形态、根际细菌群落结构。[结果]生物炭显著提升土壤pH(75 t/hm^{2}处理较对照提高1.13)并降低交换性酸(75 t/hm^{2}降幅达56.67%);45 t/hm^{2}以上处理显著增加花生生物量(64.83%)、根长(106.8%)和根表面积(95.4%);生物炭增加了土壤的细菌丰富度和多样性,15 t/hm^{2}以上处理下细菌丰富度显著高于对照,75 t/hm^{2}细菌多样性显著高于对照;RDA分析表明pH、交换性盐基、交换性酸、交换性Al^{3+}、交换性H^+、地下部生物量是影响细菌群落结构的主要环境因素($P<0.05$);变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteriota)和放线菌门(Actinomycetota)是丰度最高的细菌门;芽厚胞菌属(*Gemmatimonas*)与植株生物量、根系性状、pH以及交换性盐基呈显著正相关关系,与交换性酸、交换性Al^{3+}、交换性H^+呈显著负相关关系;厚被膜杆菌属(*Occallatibacter*)与生物量指标和pH值呈显著负相关,与交换性酸、交换性Al^{3+}、交换性H^+等酸化土壤指标呈显著正相关关系。[结论]800 ℃裂解苹果木生物炭通过提高土壤pH、降低活性铝毒性及优化细菌群落结构缓解棕壤酸化,以45 t/hm^{2}为最佳施用量。

关键词:棕壤酸化; 生物炭; 花生生长; 根际细菌; 土壤化学性质; 群落多样性
中图分类号:S141.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)06-0138-13

Biochar alleviates brown soil acidification by altering the rhizosphere microenvironment

Chen Chuanjie[1,2], Liang Xiaoyan[1,2], Liu Yanping[3], Li Meng[1,2], Zhang Haiyang[1,2], Li Dongyang[1,2], Gu Yinyu[1,2*], Liu Zhaohui[4*]

(*1.Sericulture Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Yantai 264002, China; 2.Shandong Engineering Research Center of Functional Crop Germplasm Innovation and Cultivation Utilization, Yantai 264002, China; 3.Yantai Engineering Consulting Institute, Yantai Fixed Asset Investment Project Evaluation Center, Yantai 264000, China; 4.Institute of Resources and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China*)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the ameliorative effects of apple wood-derived biochar on acidified brown soil and elucidate the mechanism by which it promotes peanut growth through modulating the soil chemical properties and microbial community. [Methods] A pot experiment was conducted with five biochar application rates (0, 7.5, 15, 45, 75 t/hm^2). Soil chemical properties (pH, organic matter, exchangeable acidity, etc.), peanut agronomic traits, root morphology, and rhizosphere bacterial community structure (via 16S rDNA high-throughput sequencing) were analyzed. [Results] Biochar significantly increased soil pH (by 1.13 units at 75 t/hm^2 compared to control) and reduced exchangeable acidity (a 44.2% decrease

收稿日期:2025-08-14　　**修回日期**:2025-09-30
基金项目:山东省现代农业产业技术体系(SDAIT-18-10);国家自然科学基金青年项目(32201917);山东省重点研发计划(乡村振兴科技创新提振行动计划)(2024TZXD077);山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QC124)
作者简介:陈传杰(ORCID:0009-0004-4879-5129),副研究员,研究方向:退化土壤修复,E-mail: chuanjie70@163.com
*通信作者**:顾寅钰(ORCID:0000-0002-0183-4045),研究员,E-mail:guyy70@163.com;刘兆辉,研究员,E-mail:nkyliuzhaohui@163.com

at 45 t/hm^2). Treatments ≥45 t/hm^2 significantly increased peanut biomass (by 64.83%), root length (by 106.8%), and root surface area (by 95.4%). Biochar increased the bacterial richness and diversity of soil, with bacterial richness significantly higher than the control at 15 t/hm^2 and bacterial diversity significantly higher than the control at 75 t/hm^2. Proteobacteria, Acidobacteriota, and Actinomycota were the most abundant bacterial phyla. *Gemmatimonas* was significantly positively correlated with plant biomass, root traits, pH, and exchangeable base, and significantly negatively correlated with exchangeable acidity, exchangeable Al^{3+}, exchangeable H^+; *Occallatibacter* was significantly negatively correlated with biomass indicators and pH value, while significantly positively correlated with soil acidification indicators such as exchangeable acidity, exchangeable Al^{3+}, and exchangeable H^+. [Conclusion]Apple wood biochar pyrolyzed at 800℃ alleviates brown soil acidification by increasing soil pH, reducing active aluminum toxicity, and optimizing bacterial community structure, and the optimal application rate is 45 t/hm^2.

Keywords: Brown soil acidification, Biochar, Peanut growth, Rhizosphere bacteria, Soil chemical properties, Community diversity

随着我国集约化农业快速发展,土壤酸化已成为威胁耕地可持续利用的核心问题[1]。我国酸化土壤面积已达218万km^2,约占国土面积的22.7%[2],主要分布于长江以南的红、黄壤区,涉及15个省(区)[3]。值得注意的是,作为农业大省的山东棕壤酸化态势日益严峻,酸性耕地面积明显增加,近30年来土壤pH值平均下降0.4,尤其是胶东半岛和东南部沿海的威海、烟台、青岛、日照、临沂和枣庄6市土壤pH降低均超过1.0[4]。这种系统性土壤酸化不仅制约作物产量品质,更危及生态安全,因此,亟需研发高效的酸化土壤改良技术以支撑耕地质量提升[3]。

施用改良剂是缓解土壤酸化的有效措施之一,目前常用的酸性土壤改良剂有石灰类、矿物、工业副产品、有机物料和生物质炭等[5]。生物炭是在缺氧条件下由生物质高温裂解而形成的含有惰性有机碳的物质[6]。因其含碳量高、比表面积大和吸附能力强等特点而广泛用于农业土壤修复研究[7]。然而,其效应受原料、土壤类型及施用量的显著影响[8]:黄超等[9]发现碱性生物炭施入(≥50 g/kg)可提升红壤pH并促进黑麦草生长,但邓万刚[10]研究表明低量生物炭(≤1%)对海南砖红壤牧草无增益。更值得注意的是,秸秆生物炭甚至导致水稻前期减产[11],而Li等[12]报道60 t/hm^{2}以下用量对pH无显著影响。这些不同结果揭示:生物炭的酸化改良效果存在显著的区域适用性与剂量依赖性,针对特定土壤-作物系统的调控机制仍需深入解析。

花生是我国重要的经济作物和油料作物[13],作为第三大种植面积的作物,在山东农业经济中占有战略地位,近年来种植面积733~800 khm^2,总产3500 kt左右,年出口600 kt以上,分别约占全国的18%、25%和90%,在农业增效、农民增收、出口创汇等方面有举足轻重的地位[14]。花生耐瘠耐旱,是改良和利用酸性土壤的重要经济途径,但严重酸化导致的土壤贫瘠仍是制约其产量品质提升的关键因素[15]。当前,仍然缺少关于生物炭如何通过"土壤化学-微生物"协同调控缓解棕壤酸化并促进花生生长的机制研究。

因此,本研究拟采用山东酸化棕壤-花生系统为对象,通过探究苹果木生物炭对土壤理化性质、根际微生物群落重建及花生生理响应的多维互作效应,旨在揭示生物炭驱动酸化土壤生态功能恢复的关键路径,为该区域酸性耕地提质增效提供理论依据与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本试验土壤采自山东省招远市毕郭镇(37.21°N,120.23°E)附近的农田棕壤土,供试土地在上一季种植玉米。采用随机布点法采集0~20 cm的表层土壤,过2 mm筛,多点混合组成供试土壤,理化性质见表1。

生物炭购自山东栖霞市泰宇生物工程有限公司,采用苹果木在850℃以上高温热解制成。供试品种为'花育25',购自山东省花生研究所。

1.2　试验方法

盆栽试验:将供试土壤和生物炭装盆作为培养基质,进行盆栽花生试验。试验设置5个处理:CK:大田酸化土壤,B1:7.5 t/hm^2,B2:15 t/hm^2,B3:45 t/hm^2,B4:75 t/hm^2。每盆土1 kg,选籽粒饱满的花生种子每盆播种3粒,出苗后留2棵健康苗,3次重复。

根系及花生农艺性状测定:花生出苗30 d后

表1 土壤和生物炭理化特性

Table 1 Soil and biochar properties

项目 Iterms	全氮/(g/kg) Total nitrogen	全磷/(mg/kg) Total phosphorus	全钾/(g/kg) Total potassium	速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium	碱解氮/(mg/kg) Alkaline nitrogen	有机质/(g/kg) Organic matter	pH
土壤 Soil	1.560	481.337	12.50	46.418	195.01	110.566	17.291	4.91
生物炭 Biochar	2.947	1 382.780	8.07	55.352	4 199.36	15.009	619.898	10.71

进行根系和农艺性状测定。将幼苗从盆中取出抖落根系土粒,用自来水洗去附着在根系上的土粒,再用蒸馏水冲洗干净,然后用吸水纸吸干植株和根表水分,称鲜质量,测株高。土壤化学性状和微生物多样性分析采用根际土进行,因为根际土直接受植物根系的影响,采用抖根法收集根际土壤,将各处理采集土壤混匀后分为2份,其中一份风干后用于土壤化学性质的测定。另一份样品保存于-80 ℃冰箱中,用于土壤微生物DNA的提取和高通量测序分析。

根系形态指标测定:将根系用清水冲洗干净后用EPSON V850 PROPHOTO扫描仪进行扫描。扫描时将根系放入特制的透明托盘内,加入1/2的水,用镊子将根系分散开,避免根系分支的互相缠绕。扫描后保存图像,采用WinRHIZO PRO 2017根系分析系统软件(RegentInstruments Inc8, Canada)分析根系表面积(RS)、根系体积(RV)、总根长(RL)和根系平均直径(RD)4个形态参数。

植株农艺性状测定:株高用直尺测量,叶面积采用叶片打孔法测定。根系及地上部生物量的测定,每处理取3株代表性植株用自来水冲洗后吸干水分,将根、地上部分开,放入烘箱内105 ℃杀青30 min,之后70 ℃烘干至恒重,电子天平称重。

土壤化学性质测定:土壤pH按照水土比2.5∶1浸提,使用pH计(Mettler S210,美国)进行测定。土壤碱解氮(AN)根据DB51/T 1875-2014土壤碱解氮的测定,采用数显滴定仪(普兰德Titrette 50 mL,德国)滴定。土壤总速效磷(AP)用紫外分光光度计(T1910普析通用)测定。速效钾(AK)依据NY/T 889-2004《土壤速效钾和缓效钾含量的测定》,用火焰光度计(上海悦丰FP640)进行。阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法,依据《NLY/T 1243-1999森林土壤阳离子交换量的测定》,采用自动定氮仪(瑞士步琦KN520)进行。交换性盐基(EB)采用Thermo Fisher iCAP 7400双通道电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES),依据LY/T 1244-1999和NY/T 1615-2008进行。可交换性酸(EA)、可交换性氢(EH)、可交换性铝(EAl)采用数显滴定仪(普兰德Titrette 50mL,德国)测定。土壤有机质(SOM)和有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$)氧化容量法测定。

土壤微生物群落组成测定:土壤样品寄送上海美吉生物医药科技有限公司,在Miseq PE300平台进行16S rDNA扩增子高通量测序。扩增区域为16S rRNA V3-V4区,引物序列为:338F(5′-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3′)/806R(5′-GGACTACHVG GGTWTCTAAT-3′),借助美吉云平台对微生物群落多样性、组成及功能预测进行分析。

1.3 数据分析

试验数据采用Excel 2019和SPSS 19. 0软件进行分析,采用LSD检验法($P<0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 生物炭对花生农艺性状的影响

由表2可见,随着生物炭添加量的增加,花生的主要农艺性状均呈逐渐增加的趋势。B4处理下,主茎高度(SH)和地上生物量(AB)显著高于CK和B1处理、叶片干重(LDW)显著高于CK;B4和B3处理下,茎干重(SDW)和总生物量(TB)显著高于对照、总生物量也显著高于B1和B2处理;B4和B3处理下,地下生物量(GB)显著高于CK和其它处理。生物炭的加入促进了酸土条件下花生幼苗的生长,高添加量的促进效果更明显。

表2　生物炭对花生主要农艺性状的影响

Table 2　The effect of biochar on the main agronomic traits of peanuts

处理 Treatments	主茎高度/cm Stem height	叶干质量/g Leaf dry weight	茎干质量/g Stem dry weight	地下部生物量/g Ground biomass	地上部生物量/g Aerial biomass	总生物量/g Total biomass
CK	21.8±3.2b	0.267±0.077b	0.279±0.100b	0.118±0.013b	0.546±0.177b	0.664±0.165c
B1	21.9±1.6b	0.313±0.042ab	0.340±0.038ab	0.132±0.018b	0.652±0.080ab	0.784±0.096bc
B2	24.0±2.7ab	0.336±0.016ab	0.358±0.016ab	0.140±0.009b	0.693±0.025ab	0.833±0.017bc
B3	24.1±2.0ab	0.388±0.065ab	0.438±0.086a	0.207±0.018a	0.826±0.145ab	1.032±0.132ab
B4	25.5±1.9a	0.417±0.082a	0.476±0.070a	0.202±0.020a	0.893±0.151a	1.095±0.132a

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05),下同。

Note: different lowercase letters indicated significant difference at 0.05 level, the same below.

2.2　生物炭对花生根系形态发育的影响

由表3可以看出,在酸土条件下,不同添加量生物炭处理的花生幼苗根系形态发育存在显著差异。根长和根表面积在生物炭添加量超过B2时显著高于对照;根体积在B3和B4下处理显著高于对照;而根直径B1处理下显著低于对照,其它处理与对照无显著差异。高添加量生物炭处理显著促进花生根系的纵向伸长,扩大根系的分布范围,但对根系的粗壮度没有显著促进作用。

表3　生物炭对花生根系形态发育的影响

Table 3　The effect of biochar on the morphological development of peanut root system

处理 Treatments	根长/cm Root length	根表面积/cm^2 Root surface Area	根直径/mm Root average diameter	根体积/cm^3 Root volumn
CK	214.4±42.6c	34.9±6.6c	0.259±0.002a	0.453±0.082b
B1	286.7±71.1bc	39.7±9.8bc	0.222±0.013b	0.440±0.110b
B2	379.1±52.2ab	54.4±9.0ab	0.231±0.019ab	0.628±0.141ab
B3	443.3±24.5a	68.2±2.0a	0.246±0.022ab	0.840±0.099a
B4	387.2±96.1ab	58.0±11.8a	0.240±0.012ab	0.692±0.111a

2.3　生物炭对花生根际土壤化学性质和酸化指标的影响

由表4可以看出,B3和B4处理显著提高土壤有机质和有机碳含量,B1、B2处理与对照没有显著差异;B3处理显著提高了土壤速效氮含量。但对照的速效磷和速效钾最高。说明生物炭的添加可以有效改善土壤有机质条件。

表4　生物炭对花生根际土壤化学性质的影响

Table 4　The effect of biochar on the chemical properties of rhizosphere soil

处理 Treatments	有机质/(g/kg) Organic matter	有机碳/(g/kg) Organic carbon	速效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium	碱解氮/(mg/kg) Alkaline nitrogen
CK	19.47±0.28b	11.29±0.16b	45.75±0.81a	174.0±10.4a	91.1±4.7b
B1	20.34±0.14b	11.80±0.08b	43.01±1.69abc	131.1±1.5c	93.2±5.2ab
B2	20.34±0.01b	11.80±0.01b	41.38±1.24bc	129.0±5.4c	93.8±2.0ab
B3	24.33±1.39a	14.11±0.81a	40.70±0.94c	152.4±8.4b	97.0±2.4a
B4	25.14±0.41a	14.58±0.24a	43.61±1.69ab	169.3±17.0ab	88.6±2.2b

由表5可以看出,B4处理的pH值显著高于B3,而B3处理又显著高于B2和B1处理,B1和B2处理也能使pH值分别提高0.11和0.18,但没有达到显著水平;交换性酸在CK和B1处理显著高于其它处理;交换性H^+在B1处理最高,其次是CK和B2处理;交换性Al^{3+}在CK处理显著高于生物炭处理;阳离子交换量在CK处理最高,其次是B3处理;交换性盐基在B4处理显著高于其它处理。

表5 生物炭对花生根际土壤酸化特征的影响

Table 5 The effect of biochar on the acidification characteristics of rhizosphere soil **cmol/kg**

处理 Treatments	pH	阳离子交换量 Cation exchange capacity	交换性盐基 Exchangeable base	交换性酸 Exchangeable acidity	交换性H^+ Exchangeable H^+	交换性Al^{3+} Exchangeable Al^{3+}
CK	5.00±0.09c	21.11±1.28a	8.43±0.40b	2.40±0.12a	1.12±0.15b	1.276±0.087a
B1	5.11±0.07c	18.04±0.94bc	8.49±0.14b	2.23±0.03a	1.42±0.12a	0.810±0.101b
B2	5.18±0.01c	17.70±1.61c	8.56±0.06b	1.92±0.10b	1.13±0.13b	0.788±0.158b
B3	5.49±0.25b	20.90±2.09ab	8.92±0.54b	1.34±0.11c	0.69±0.04c	0.647±0.071b
B4	6.13±0.20a	16.98±0.16c	9.87±0.07a	1.04±0.04d	0.69±0.03c	0.352±0.044c

2.4 生物炭对花生根际细菌群落多样性的影响

Sobs、Ace、Chao、Shannon指数在B4处理最高，CK最低；Simpson指数在各处理之间没有差异(表6)。说明B4处理的细菌群落丰富度和多样性都是最高的。

采用Bray-Curtis算法计算样品间距离，经主坐标分析(PCoA)结果显示(图1a)：第1个主坐标轴(PCoA1)解释16.32%的变异，第2主坐标轴(PCoA2)解释8.73%的变异。各处理组样品微生物群落聚集区域距离差异明显，除了B1和B2处理之外区域之间间隔清晰，细菌群落差异显著($P<0.05$)。其中，CK与B4处理较远，其余3个处理介于两者之间，可以明显看出随着生物炭添加量的增加细菌群落结构与CK的离散度越高。而B1和B2处理距离最近，说明两者细菌群落结构更相似。

表6 不同生物炭处理花生根际土Alpha多样性

Table 6 Alpha diversity of peanut rhizosphere soil treated with different biochars

处理 Treatments	Ace指数 The ACE estimator	Chao指数 The Chao1 estimator	Coverage指数 The Good's coverage	Shannon指数 The Shannon diversity index	Simpson指数 The Simpson diversity index	Sobs指数 The observed richness
CK	2 868.1±135.2c	2 834.1±131.9c	0.989±0.001 0a	6.02±0.05b	0.008 2±0.000 9a	2 383.3±66.2c
B1	2 916.9±16.6c	2 911.9±19.9c	0.989±0.000 1a	6.11±0.05ab	0.007 6±0.000 9a	2 452.0±23.3bc
B2	3 003.2±57.6bc	2 964.2±117.4bc	0.988±0.000 5ab	6.11±0.16ab	0.008 3±0.002 7a	2 489.7±63.0b
B3	3 124.4±74.9ab	3 079.0±37.7ab	0.988±0.000 2ab	6.14±0.12ab	0.008 1±0.001 2a	2 614.7±96.7a
B4	3 181.8±26.6a	3 147.1±58.7a	0.988±0.000 4b	6.28±0.20a	0.007 7±0.004 4a	2 662.7±70.2a

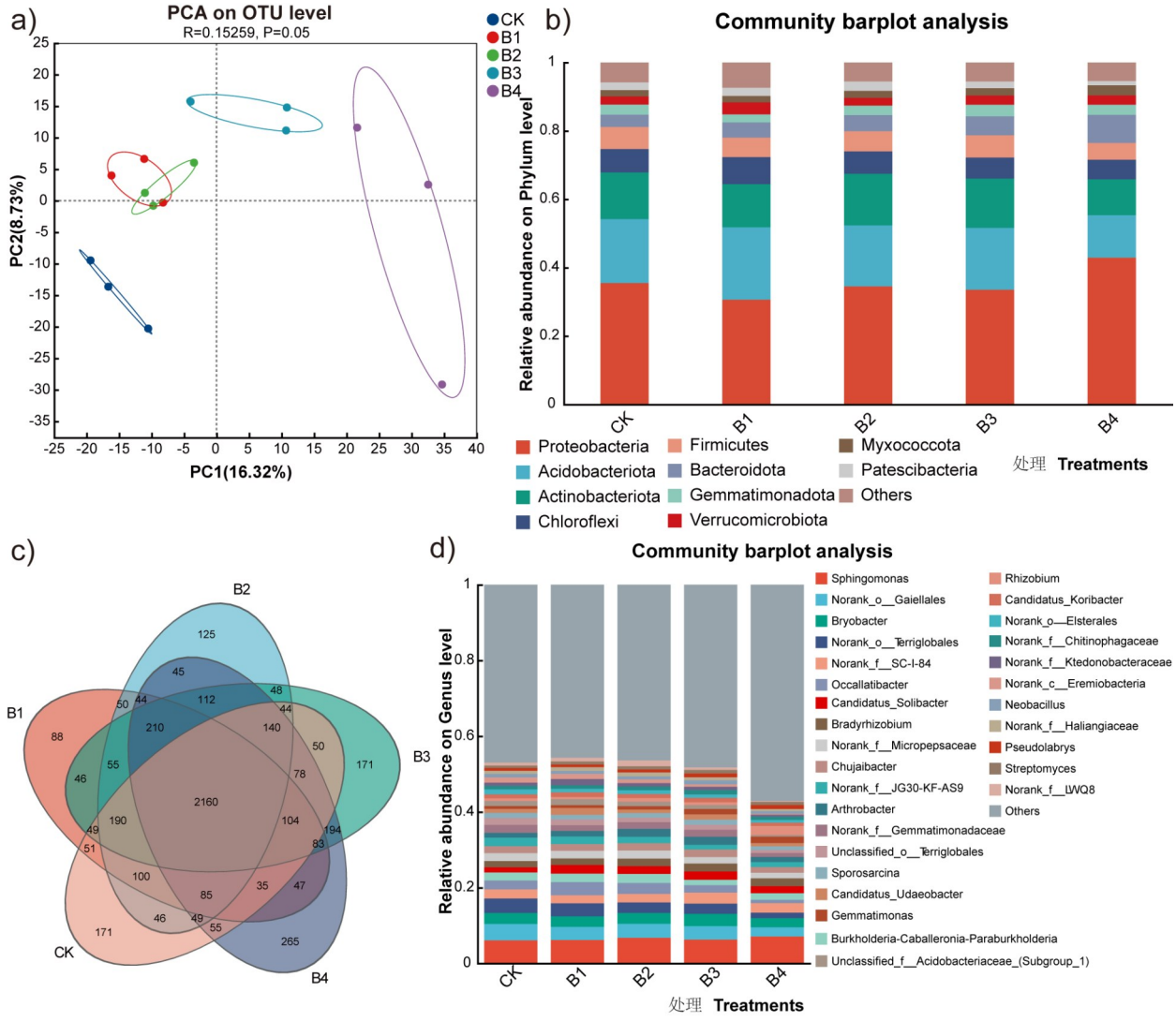
2.5 生物炭对土壤细菌群落组成结构的影响

利用韦恩图对各处理土壤样品间共有和特有OTU数进行分析，图1b结果显示5个处理的细菌共有OTU为2160个，B1、B2、B3、B4处理特有的OTU数量分别为88、125、171和265个，随着生物炭施用量的增加而增加，CK则为171个。由图1c可见，不同处理下门水平细菌群落组成存在差异，各处理土壤细菌群落相对丰度大于10%的优势菌门均为假单胞菌门(Pseudomonadota)、酸杆菌门(Acidobacteriota)、放线菌门(Actinomycetota)，三者累计相对丰度超过60%。由图1d可以看出，不同处理属水平土壤细菌群落组成存在差异，相对丰度排名前2位的在所有处理中均为*Sphingomonas*和*norank_o__Gaiellales*，排名第3的属则是因处理而异，CK是*norank_o__Terriglobales*，B1和B2是*Occallatibacter*，B3是*Bryobacter*，B4是*norank_f__SC-I-84*。

采用LEfSe分析(LDA阈值为2.5)进一步筛选不同生物炭用量下土壤细菌的显著差异物种，结果如图2所示。共识别出118个显著差异物种($P<0.05$)，其中CK显著富集的25个细菌群落来自6个门、7个纲、11个目、10个科、10个属；B1显著富集的16个细菌群落来自5个门、6个纲、5个目、4个科、5个属；B2显著富集的2个细菌群落来自1个门、1个纲、1个目、1个科、1个属；B3显著富集的2个细菌群落来自2个门、2个纲、2个目、2个科、2个属；B4显著富集的73个细菌群落来自12个门、17个纲、26个目、27个科、31个属。

2.6 环境因子与细菌群落的相关性分析

基于RDA方法分析不同处理下细菌群落和



a) Otu 水平的 PCA 分析; b) Otu 水平的韦恩图;c)门水平的 Bar 图;d)属水平的 Bar 图

a)PCA on otu level; b) Venn on otu level;c) Bar on phylum level. d) Bar on genus level

图 1　Beta 多样性和群落组成

Fig.1　Beta diversity and community composition

土壤理化性质的关系,如图 3a 所示,RDA1 轴、RDA2 轴分别解释了总变异的 35.78%、18.31%。其中 EA($P<0.01$)、pH($P<0.01$)、EB($P<0.01$)、EAl($P<0.01$)、EH($P<0.05$)、GB($P<0.05$)是影响细菌群落的主要环境因素。

将土壤的化学性质与植株生物量和根系主要性状进行变量间的 Pearson 相关性分析,结果如图 4 所示。pH 与植株生物量和根系性状呈显著正相关,与土壤 EB、EA、EAl 呈显著负相关关系;植株生物量和根系性状之间呈显著正相关;EB 与植株生物量和 RS 呈显著正相关,与土壤 EB、EA、EAl 呈显著负相关关系;EA 与 EB、EAl 呈显著正相关,与植株生物量和根系性状呈显著负相关关系;EH 与 EA 呈显著正相关,与除根长以外的根系性状和生物量呈显著负相关关系;EAl 与 EA 和 CEC 呈显著正相关,与除根体积以外的根系性状和生物量呈显著负相关关系。

以主要环境因子与各处理属分类水平前 20 丰度的细菌进行相关性分析,由图 5 可见,*Gemmatimonas* 与植株生物量、根系性状以及 pH、EB 呈显著正相关关系,与 EH、EA、EAl 呈显著负相关关系;*Bradyrhizobium* 与 AB、pH 呈显著正相

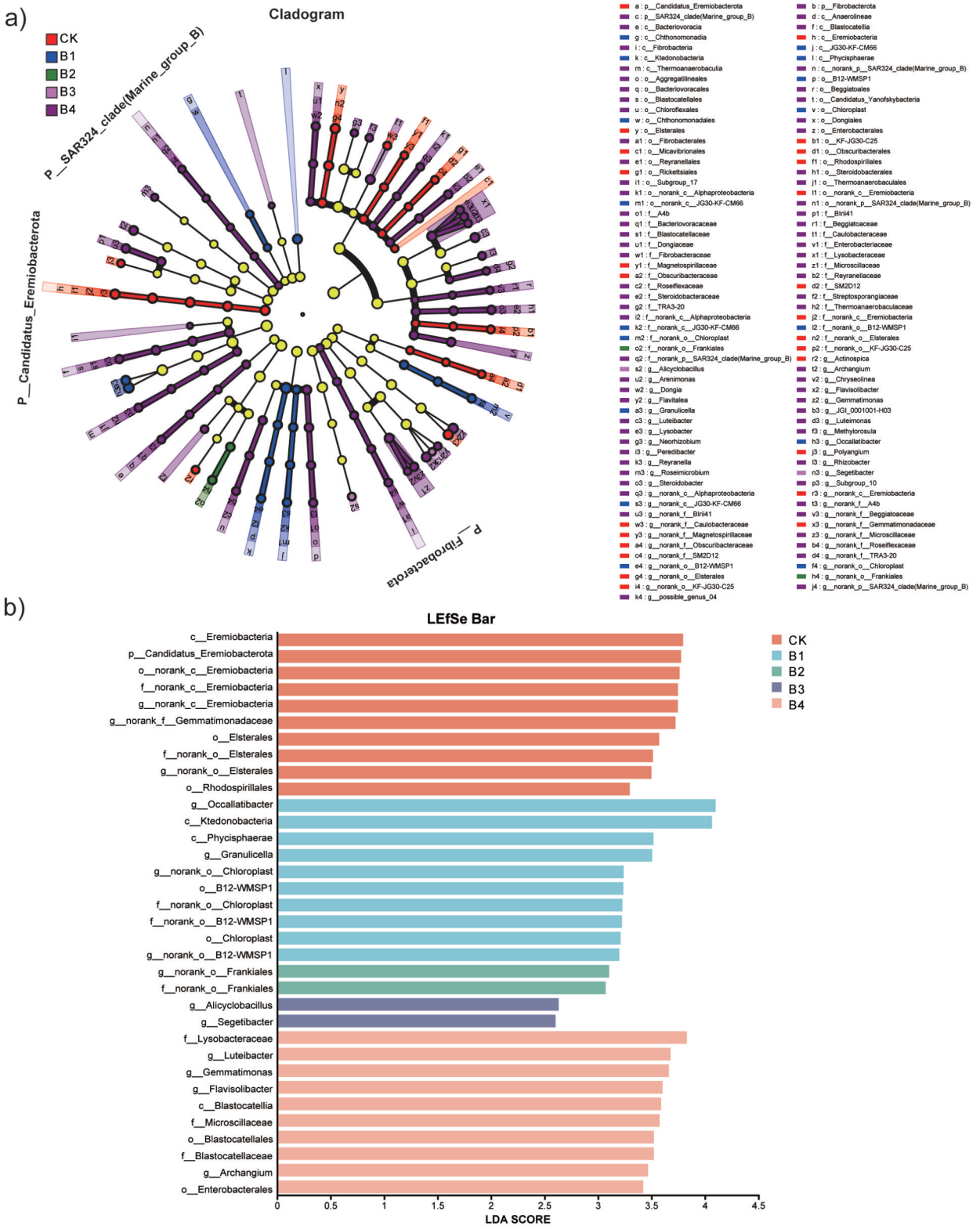


图2 LEfSe和LDA

Fig.2 LEfSe and LDA

关,与EA、EA1呈显著负相关关系;*Rhizobium*与EB、AB呈显著正相关,与SOM、AN呈显著负相关关系;*Arthrobacter*与SOM和AN呈显著正相关关系;*Occallatibacter*、*norank_o__Terriglobales*、

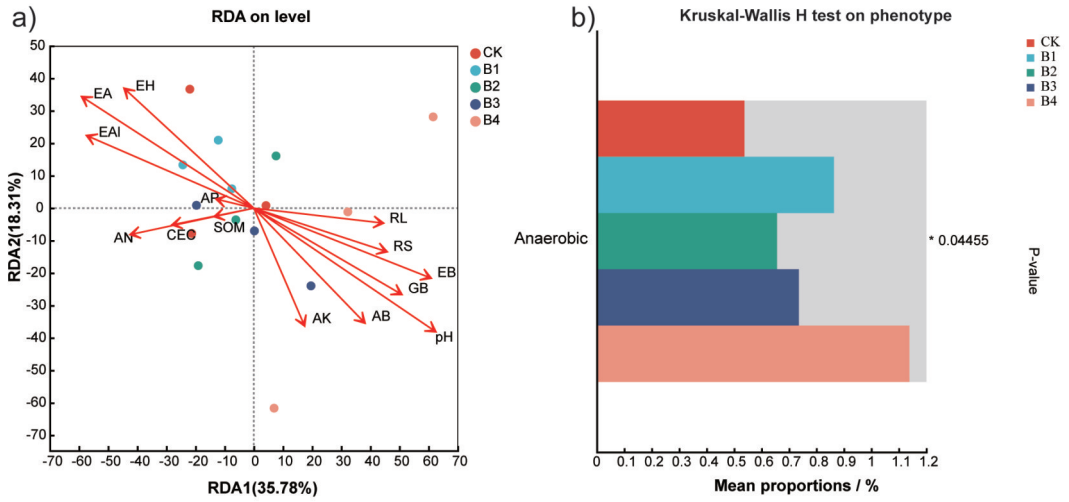


图3　RDA和Bugbase表型预测

Fig.3　RDA and Bugbase

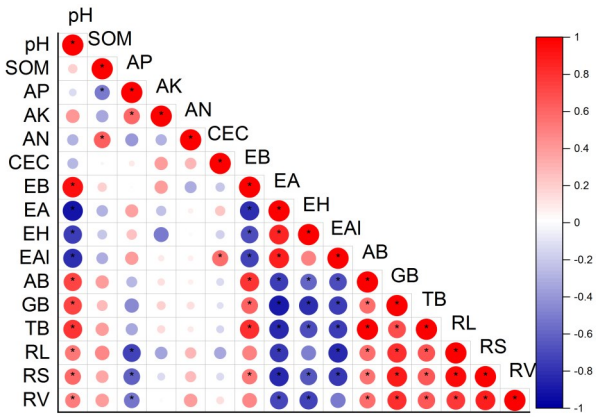


图4　环境因子相关分析

Fig.4　Environmental factor correlation analysis

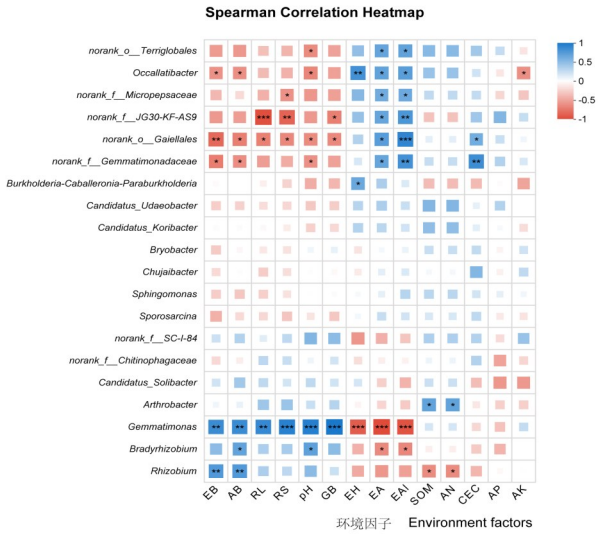


图5　相关性热图

Fig.5　Heatmap of Spearman correlation

norank_o__Gaiellales、*norank_f__Gemmatimonadaceae*、*norank_f__Micropepsaceae*、*norank_f__JG30−KF−AS9*、*Burkholderia−Caballeronia−Paraburkholderia*与植株生物量、根系性状呈显著负相关,而与EH、EA、EAI、CEC等酸化土壤指标呈显著正相关关系的细菌。

2.7　微生物功能预测

BugBase表型预测可以确定样本中存在的高水平表型,进行表型预测。各处理下的花生土壤细菌的表型预测结果见图3b,与对照相比,施用生物炭显著提高了厌氧(Anaerobic)菌的相对丰度。

3　讨论

3.1　生物炭通过调控根际土壤化学性质缓解棕壤酸化

土壤酸化源于交换性H^+与Al^{3+}的积累,通常采用活性酸和潜性酸表征土壤酸度,土壤pH值代表活性酸的强度,即H^+所表现的酸性,可以直观反映土壤的酸度状况[16]。生物炭对土壤pH值产生影响的程度通常取决于原料和生产条件[17]。比如经过44 d的培育,添加5%的400 ℃热解的花生壳生物炭可以使果园酸化土壤pH提高1.33[18];在茶园施用4.5 t/hm^{2}玉米秸秆生物炭可将土壤pH值提高0.30[19];施加pH值为10.2的玉米秸秆生物炭20 mg/hm^{2}可以使土壤pH增加0.6[20]。本研究在酸化棕壤中施加生物炭,栽培花生30 d后使土

壤pH值提高1.13,且在45 t/hm²以上施用量与CK差异显著。与其它研究pH提高的差异可能是因为本研究采用的是在800 ℃热解苹果木生产的生物炭,原始pH值高达10.71。潜性酸代表了土壤中潜在的酸性,通常指土壤胶体表面吸附的交换性H^+和交换性Al^{3+},只有被交换到土壤溶液中才表现出酸性,因此潜性酸是土壤活性酸的主要来源和储备,土壤活性酸与潜性酸始终处于动态平衡之中,相关指标对土壤酸化具有重要表征意义[21]。研究表明施加生物炭可以降低土壤交换性Al^{3+}[22]、交换性酸以及交换性H^+[23]。本研究结果与上述结报道一致,各处理均能降低交换性酸,降幅随生物炭的施加量而增加,且在生物炭施加量为15 t/hm²以上达到显著水平,而交换性Al^{3+}则在生物炭用量为7.5 t/hm²可达到显著水平。

土壤阳离子交换量是指土壤胶体表面所能吸附的各种阳离子的总量,直接反映了土壤的供肥性和缓冲能力,可以作为土壤改良的重要依据[16]。施加生物炭对土壤阳离子交换量的影响在以往的报道中不尽相同[22,24-26]。本研究中,施加生物炭处理显著降低了土壤阳离子交换量,这是生物炭原料和热解温度造成的,研究发现当热解温度从450 ℃增大到700 ℃时,生物炭阳离子交换量从26.36 cmol/kg降至10.28 cmol/kg[27]。阳离子交换量主要受比表面积影响,当热解温度达到600~700 ℃时生物炭的比表面积随着热解温度的上升而下降[28],另外,原料不同比表面积基于碳化温度变化的规律也不同,苹果枝条生物质炭的比表面积在700 ℃时为61.911 m²/g,远低于500 ℃的143.079 m²/g,在300、500和700 ℃时先增大再减少,而核桃和桃等则是持续增大。推测是在炭化温度大于700 ℃时,挥发物的形成改变了微结构的顺序,使材料的微结构发生坍塌,导致微孔数量减少[29]。本研究采用的是苹果木在800 ℃高温下裂解的生物炭,因此,阳离子交换量显著低于对照。土壤交换性盐基离子(K^+、Na^+、Ca^{2+}和Mg^{2+})对维持土壤养分和缓冲性能起关键作用,与以往研究施用生物炭增加交换性盐基总量[22,30]一致的是本研究中施加75 t/hm²生物炭显著提高了交换性盐基总量,其余处理也增加但不显著,可能是由于土壤盐基离子变化受生物炭特性和施用方式影响[31]。另外,本研究中交换性盐基与pH、花生生物量和根系指标呈正相关关系,与交换性酸、交换性H^+、交换性Al^{3+}呈显著负相关关系。这与以往的研究一致[22-23]。生物炭本身富含有机质,所以在45 t/hm²施用量以上可显著增加土壤有机质,也与以往研究一致[30,32]。

3.2 生物炭影响酸土条件下花生生长和根系发育

生物炭在降低土壤酸度的同时,也对作物生长产生积极影响[15]。耿娜等[33]研究发现,在酸化棕壤上施用生物炭,可以使油菜的产量提高37.50%~159.68%;马一博等[32]发现在酸化土壤上施用玉米和水稻秸秆生物炭,大豆产量分别提高了3.97%和7.27%。本研究与前人研究一致,施用生物炭可以提高花生幼苗的株高以及各部位的生物量,其中总生物量可以提高18.02%~64.83%,但只有在75 t/hm²施用条件下显著高于对照。另外,本研究发现45 t/hm²以上的生物炭施用量可以显著促进根长、根表面积、以及根体积增加。这与梁晓艳等[34]的研究一致,生物炭处理显著促进藜麦根系的纵向伸长及侧根的发生,但与之不同的是在本研究中生物炭对花生幼苗根系的直径没有显著促进效果,这可能与植物物种、环境条件等有关。生物炭对酸土条件下花生产量和根系直径的影响还需进一步研究。

3.3 生物炭对棕壤酸化条件下花生根际细菌群落多样性的影响及其与环境互作

微生物是农田土壤生态系统的重要组成部分,通过分解有机物质,释放植物可利用的无机养分来驱动土壤养分循环,提高植物生产力[35]。土壤酸化使微生物的生长和活动受到抑制,从而影响土壤有机质的分解和养分的循环。而生物炭可以增加有机质,改善细菌丰富度和多样性[32,36],也有报道认为生物炭添加量在60 t/hm²以上细菌丰富度和多样性均显著低于对照和低浓度[37],本研究中随着生物炭添加量的增加,细菌的丰富度和多样性均呈递增趋势,且75 t/hm²施用量为最高,其中15 t/hm²以上处理的细菌丰富度显著高于对照,7.5 t/hm²处理的细菌多样性高于对照,但只有75 t/hm²处理显著高于对照。推测由于生物炭具有多孔性和表面吸附性能,能够储存水分、养分,为微生物提供良好的生存环境;另外,生物炭本身含有充足的矿质养分和易分解有机碳,可为微生物的生长代谢提供所需的养分和能源[35-37]。因此,生物炭含

量越高,越有利于微生物的生存。与其它研究不同的原因可能与生物炭的原料或试验环境不同有关。

本研究丰度前3的门是变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteriota)和放线菌门(Actinomycetota),与其它研究中胶东酸土丰度最高的是放线菌门、变形菌门、酸杆菌门[38]一致的是3个门种类相同,不一致的是3个门排序不同。pH被认为是影响微生物群落结构的重要因子,Wang等[39]认为pH值对细菌群落物种丰富度的影响大于营养;Jutakanoke等[40]认为用生物炭处理土壤可以改变土壤的pH值进而改变土壤中微生物的多样性;王义祥等[40]也认为生物炭处理的土壤pH值是显著影响细菌群落结构的环境因子。本研究结果与上述研究一致,RDA分析揭示pH是生物炭处理下影响花生根际细菌群落的主要环境因素,除此以外还有与之相关的交换性酸、交换性H^+、交换性Al^{3+}、交换性盐基以及根系生物量。

在属分类水平上,本研究中最优势属鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*),据报道能够分解多种有机化合物,有助于改善土壤质量进而促进植物生长、提高植物抗逆性[41],其功能基因相对丰度与土壤pH呈显著正相关[42]。在本研究中与对照相比虽然没有达到显著水平,但生物炭处理组的丰度也高于对照。芽单胞菌属(*Gemmatimonas*)是一种聚磷富集菌[43],具有增加土壤有机质含量和促进微生物固氮、抑制植物病害、和促进植物生长的作用[44-45]。生物炭的施用可增加土壤有效磷的含量,提高芽单胞菌属的相对丰度[46]。本研究中芽单胞菌属与植株生物量、根系性状以及土壤pH、交换性盐基呈显著正相关关系,与交换性酸、交换性H^+、交换性Al^{3+}呈显著负相关关系,并且在75 t/hm^{2}生物炭处理中显著富集,说明生物炭促进了芽单胞杆菌在花生根际的富集。厚被膜杆菌属(*Occallatibacter*)属于酸杆菌门,产生的类胡萝卜素可以赋予土壤中的酸杆菌(Acidobacteria)对环境氧化应激的耐受性[47],属于寡营养菌[48]。本研究中*Occallatibacter*的相对丰度排名第6且随生物炭添加量的增加而下降,与交换性酸、交换性H^+、交换性Al^{3+}呈显著正相关,与生物量指标和pH值呈显著负相关,说明其可能更适应酸性环境。

BugBase表型预测显示施用生物炭显著提高了厌氧(Anaerobic)菌的相对丰度,而生物质炭发达的多孔结构可以使土壤表层的孔隙度增大改善土壤结构[27]。至于施用生物炭在土壤孔隙度增加的情况下显著增加了厌氧菌的相对丰度的原因还需要进一步研究。另外,生物炭施入土壤后的长期效果也需要进一步的研究。

4　结论

本研究通过多维度解析苹果木生物炭(800 ℃裂解)对酸化棕壤的改良效果:提升土壤pH(75 t/hm^{2}处理较对照提高1.13个单位),降低交换性酸含量(45 t/hm^{2}时降幅达44.2%)及活性铝毒性,同时增加交换性盐基离子总量;重塑细菌群落结构,促进有益菌属(如芽单胞菌属)富集,抑制酸胁迫相关菌属(如厚被膜杆菌属),明确土壤pH与交换性铝是驱动细菌群落重构的关键因子($P<0.01$)。确立45 t/hm^{2}为兼顾生态效益与生产效益的最优施用量,该用量下花生生物量、根长和根表面积分别增加64.83%、106.8%和95.4%,且根系纵向扩展显著;土壤细菌群落丰富度与均匀度协同提升,形成更稳定的微生态网络。苹果木生物炭(800℃裂解)通过提升土壤pH、降低活性铝毒性、提升细菌群落丰富度和多样性以及优化细菌群落结构来调控根际土壤化学性质和细菌群落结构显著改善酸化棕壤。本研究可为棕壤酸性耕地改良提供理论依据和技术参数。

参　考　文　献

[1]Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.

[2]沈仁芳,赵学强. 酸性土壤可持续利用[J]. 农学学报,2019,9(3):16-20.
Shen R F, Zhao X Q. The sustainable use of acid soils[J]. Journal of Agriculture,2019, 9(3): 16-20.

[3]赵学强,潘贤章,马海艺,等. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. 土壤学报,2023,60(5): 1248-1263.
Zhao X Q, Pan X Z, Ma H Y, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1248-1263.

[4]李涛,于蕾,万广华,等. 近30年山东省耕地土壤pH时空变化特征及影响因素[J]. 土壤学报,2021,58(1):180-190.
Li T, Yu L, Wan G H, et al. Spatio-temporal variation of farmland soil pH and associated affecting factors in the past 30 years of Shandong Province,China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021,58(1):180-190.

[5]刘娇娴,崔骏,刘洪宝,等. 土壤改良剂改良酸化土壤的研究进

展[J].环境工程技术学报,2022,12(1):173-184.
Liu J X, Cui J, Liu H B, et al. Research progress of soil amelioration of acidified soil by soil amendments[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 173-184.

[6]姜井军,郭瑞,陈伶俐.生物炭对酸性土和盐碱土改良效果的研究进展[J].农业开发与装备,2014,(11):30-32.
Jiang J J, Guo R, Chen L L. Research advances in biochar amelioration of acidic and saline-alkali soils[J]. Agricultural Development & Equipments, 2014, (11): 30-32.

[7]代舟,孟军,田晓翠,等. 生物炭对东北酸性土养分含量、酶活性及大豆产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2016,28(4):1-5.
Dai Z, Meng J, Tian X C, et al. Effects of biochar on acid soil nutrient content, enzyme activity and the soybean yield in Northeast China[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2016, 28(4): 1-5.

[8]Chen L M, Sun S L, Yao B, et al. Effects of straw return and straw biochar on soil properties and crop growth: a review[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 986763.

[9]黄超,刘丽君,章明奎. 生物质炭对红壤性质和黑麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2011,37(4):439-445.
Huang C, Liu L J, Zhang M K. Effects of biochar on properties of red soil and ryegrass growth[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2011, 37(4): 439-445.

[10]邓万刚,吴鹏豹,赵庆辉,等.低量生物质炭对2种热带牧草产量和品质的影响研究初报[J].草地学报,2010,18(6):844-847,853.
Deng W G, Wu P B, Zhao Q H, et al. The effect of biochar on grass yield and quality[J], Acta Agrestia Sinica, 18(6), 844-847, 853.

[11]Huang M, Fan L, Jiang L G, et al. Continuous applications of biochar to rice: effects on grain yield and yield attributes[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(3): 563-570.

[12]Li C J, Xiong Y W, Qu Z Y, et al. Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China[J]. Geoderma, 2018, 331: 100-108.

[13]梁晓艳,顾寅钰,李萌,等.盐胁迫下不同耐盐性花生品种形态及生理差异研究[J].花生学报,2018,47(1):19-26.
Liang X Y, Gu Y Y, Li M, et al. Study on the morphological and physiological differences of different salt tolerant peanut varieties under salt stress[J]. Journal of Peanut Science, 2018, 47(1): 19-26.

[14]王才斌. 实施理性栽培,推进山东花生生产可持续发展[J].花生学报,2018,47(1):74-76,68.
Wang C B. Rational cultivation promotes the sustainable development of peanut production in Shandong[J]. Journal of Peanut Science, 2018, 47(1): 74-76, 68.

[15]胡仁,龙巧玲,王力敏,等.生物炭对酸性土壤改良效果及机制的研究进展[J].华中农业大学学报, 2025,44(4):11-21.
Hu R, Long Q L, Wang L M, et al. Progress on effects and mechanism of biochar on amelioration of acidified soils[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025, 44(4): 11-21.

[16]吴建娇,吴景贵,吴双. 不同有机物料长期施用对黑土酸化阻控的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报,2024:1-7(2024-07-22) [2025-09-17]. https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.0549.
Wu J J, Wu J G, Wu S. Effect of long-term application of different organic materials on acidification control in black soil [J/OL]. China Industrial Economics: 2024: 1-7. (2024-07-22) [2025-09-17]. https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2024.0549.

[17]Allohverdi T, Mohanty A K, Roy P, et al. A review on current status of biochar uses in agriculture[J]. Molecules, 2021, 26(18): 5584.

[18]王震宇,徐振华,郑浩,等. 花生壳生物炭对中国北方典型果园酸化土壤改性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(8):86-91.
Wang Z Y, Xu Z H, Zheng H, et al. Effect of peanut hull biochar on amelioration of typical orchard acidic soil in northern China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(8): 86-91.

[19]杜颖颖,林海裕,张俊,等. 不同施肥处理对老茶园土壤改良及茶叶品质的影响研究[J]. 中国茶叶加工,2025(1):48-56.
Du Y Y, Lin H Y, Zhang J, et al. Effects of different fertilization treatments on soil improvement and tea quality in aged tea garden[J]. China Tea Processing, 2025(1): 48-56.

[20]Zhang J Q, Huang Y L, Lin J Q, et al. Biochar applied to consolidated land increased the quality of an acid surface soil and tobacco crop in Southern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(8): 3091-3102.

[21]周洁莹,张黎明,杨文浩,等.福建省耕地土壤潜性酸动态变化及其驱动因素[J].应用生态学报,2019,30(3):913-922.
Zhou J Y, Zhang L M, Yang W H, et al. Dynamic and its driving factors of soil potential acid in croplands of Fujian Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 913-922.

[22]郭春雷,李娜,彭靖,等. 秸秆直接还田及炭化还田对土壤酸度和交换性能的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(5):1205-1213.
Guo C L, Li N, Peng J, et al. Direct returning of maize straw or as biochar to the field triggers change in acidity and exchangeable capacity in soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(5): 1205-1213.

[23]耿明昕,关松,孟维山,等. 秸秆还田与生物炭施用影响黑土有机质并缓解土壤酸化[J]. 吉林农业大学学报,2023,45(2):178-187.
Geng M X, Guan S, Meng W S, et al. Effects of straw returning and biochar application on soil organic matter and mitigate soil acidification of black soil[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2023, 45(2): 178-187.

[24]陈心想,耿增超. 生物质炭在农业上的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(2):167-174.

Chen X X, Geng Z C. Application of biochar in agriculture[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(2): 167-174.

[25]刘玉学,王耀锋,吕豪豪,等. 不同稻秆炭和竹炭施用水平对小青菜产量、品质以及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(6):1438-1444.
Liu Y X, Wang Y F, Lü H H, et al. Effects of different application rates of rice straw biochar and bamboo biochar on yield and quality of greengrocery (*Brassica chinensis*) and soil properties[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(6): 1438-1444.

[26]赵硕,赵影,赵曼利,等. 600℃秸秆生物炭对典型黑土阳离子交换性能和盐基离子组成的影响[J]. 黑龙江农业科学,2018(9):41-44.
Zhao S, Zhao Y, Zhao M L, et al. Effects of 600 ℃ straw biochar on cation exchange capacity and base ion composition in typical black soil[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2018(9):41-44.

[27]Lee J W, Kidder M, Evans B R, et al. Characterization of biochars produced from cornstovers for soil amendment[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(20): 7970-7974.

[28]谢祖彬,刘琦,许燕萍,等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. 土壤,2011,43(6):857-861.
Xie Z B, Liu Q, Xu Y P, et al. Advances and perspectives of biochar research[J]. Soils, 2011, 43(6): 857-861.

[29]张培,李思锦,李金磊,等. 炭化温度对果树枝条生物质炭理化性质的影响[J]. 东北林业大学学报,2025,53(9):90-100.
Zhang P, Li S J, Li J L, et al. Effect of carbonization temperature on physicochemical properties of fruit tree branch biomass charcoal[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2025, 53(9): 90-100.

[30]杨彩迪,宗玉统,卢升高. 不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响[J]. 环境科学,2020,41(4):1914-1920.
Yang C D, Zong Y T, Lu S G. Dynamic effects of different biochars on soil properties and crop yield of acid farmland[J]. Environmental Science, 2020, 41(4): 1914-1920.

[31]冉继伟,齐昕,武栋,等. 施用生物炭对土壤养分有效性和离子交换性能影响的整合分析[J]. 中国生态农业学报(中英文),2023,31(9):1449-1459.
Ran J W, Qi X, Wu D, et al. Impacts of biochar application on soil nutrient availability and exchangeable based cations: a meta-analysis[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(9): 1449-1459.

[32]马一博,孟令义,殷大伟. 生物炭对酸性土的作用效果及对大豆产量的影响[J]. 农场经济管理,2024(11):59-61.
Ma Y B, Meng L Y, Yin D W. Effects of biochar on acidic soil and its impact on soybean yield [J]. Farm Economic Management, 2024(11): 59-61.

[33]耿娜,康锡瑞,颜晓晓,等. 酸化棕壤施用生物炭对油菜生长及土壤性状的影响[J]. 土壤通报,2022,53(3):648-658.
Geng N, Kang X R, Yan X X, et al. Effects of biochar improvement on rape growth and soil properties in acidified brown earth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(3): 648-658.

[34]梁晓艳,衣葵花,李萌,等. 生物炭对盐碱地藜麦根系生长及生理特性的影响[J]. 山东农业科学,2020,52(12):24-29,38.
Liang X Y, Yi K H, Li M, et al. Effects of biochar on root growth and physiological characteristics of quinoa in saline-alkali soil[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(12): 24-29, 38.

[35]张天赐,白玲利,马怡斐,等. 牡蛎壳粉结合秸秆还田对稻田土壤酸化改良及细菌群落结构的影响[J]. 中国土壤与肥料,2025(9):50-61.
Zhang T C, Bai L L, Ma Y F, et al. Effects of oyster shell powder combined with straw returning on soil acidification improvement and bacterial community structure in paddy field [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2025(9): 50-61.

[36]王义祥,黄家庆,叶菁,等. 生物炭对酸化茶园土壤性状和细菌群落结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(11):1967-1977.
Wang Y X, Huang J Q, Ye J, et al. Effects of biochar on the properties and bacterial community structure of acidified tea garden soils [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(11): 1967-1977.

[37]周凤,耿增超,许晨阳,等. 生物炭用量对(土娄)土微生物量及碳源代谢活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(8):1277-1289.
Zhou F, Geng Z C, Xu C Y, et al. Effect of biochar addition on soil microbial biomass and metabolic activities of carbon sources in Lou soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(8): 1277-1289.

[38]王婷婷. 胶东半岛棕壤酸化特性及微生物群落多样性研究[D]. 泰安:山东农业大学,2020.
Wang T T. Acidification characteristics and microbial community diversities of brown soils in Jiaodong Peninsula, China[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.

[39]Wang C Y, Zhou X, Guo D, et al. Soil pH is the primary factor driving the distribution and function of microorganisms in farmland soils in northeastern China [J]. Annals of Microbiology. 2019, 69(13): 1461 - 1473.

[40]Jutakanoke R, Intaravicha N, Charoensuksai P, et al. Alleviation of soil acidification and modification of soil bacterial community by biochar derived from water hyacinth Eichhornia crassipes[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1), 397.

[41]Asaf S, Numan M, Khan A L, et al. Sphingomonas: from diversity and genomics to functional role in environmental remediation and plant growth [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2020, 40(3): 1-15.

[42]吴启华,陈迪文,周文灵,等. 生物炭添加对微塑料污染土壤养分和微生物群落及功能的影响[J]. 环境科学研究,2024,37(12):2757-2770.
Wu Q H, Chen D W, Zhou W L, et al. Effects of biochar addition on soil nutrient and bacterial communities and functions in soil contaminated with microplastics[J]. Research of Environmental Sciences, 2024, 37(12): 2757-2770.

[43]Yin C T, Hulbert S H, Schroeder K L, et al. Role of bacterial

communities in the natural suppression of *Rhizoctonia solani* bare patch disease of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Applied and Environmental Microbiology,2013,79(23):7428-7438.

[44]陈海浪,罗家欣,何洋,等.减氮配施生物炭对水稻生产力及土壤细菌群落组成的影响[J].农业环境科学学报,2023,42(9):1983-1994.
Chen H L, Luo J X, He Y, et al. Effects of nitrogen reduction combined with rice straw biochar on rice yield traits and soil bacterial community structure and function[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(9): 1983-1994.

[45]Wang M J, Yang X L. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on blueberry growth and rhizosphere soil microenvironment[J]. PeerJ,2024,12:e16992.

[46]Dobrovolskaya T G, Golovchenko A V, Lysak L V, et al. Taxonomic structure of bacterial communities of rhizospheric soil under bogs' plants[J]. Moscow University Soil Science Bulletin, 2020, 75(2), 93-100.

[47]Pinto O H B, Costa F S, Rodrigues G R, et al. Soil acidobacteria strain AB23 resistance to oxidative stress through production of carotenoids[J]. Microbial Ecology, 2021, 81(1):169-179.

[48]林祎.改性生物炭对酸化茶园土壤肥力性状及茶树生长的影响[D].福州:福建农林大学,2022.
Lin Y. Effects of modified biochar on soil fertility and tea tree growth in acidified tea garden [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022.

(编辑:马荣博)