DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.06.039
张雅婷,楼雪怡,吴嘉睿,等.炭菌联作对盐碱土性质及甜瓜光合指标的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):352-362,371.
ZHANG Y T, LOU X Y, WU J R, et al. Combined effects of humic acid-modified magnetic biochar and AMF on the properties of saline-alkali soil and photosynthetic parameters of muskmelon[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(6):352-362,371.

炭菌联作对盐碱土性质及甜瓜光合指标的影响

张雅婷,楼雪怡,吴嘉睿,刘宏缘,叶玢妤,肖佳敏,李佳萌,
缪怡宁,陈馨妍,刘怡琳,谭驭宇,王志超,刘 鹏
(浙江师范大学生命科学学院植物学实验室,浙江 金华 321004)

摘 要:[**目的**]为改良腐殖酸—磁性生物炭(HA—MBC),并探究改良后的 HA—MBC 与丛枝菌根真菌(AMF)联合作用对盐碱土性质与甜瓜生长的影响。[**方法**]通过响应面优化法,分析磁性生物炭与腐殖酸配比(1∶4,1∶6,1∶8)、$FeCl_3$、$FeSO_4$试剂浓度(0.02,0.04,0.06 g/mL)及交联时长(48,72,96 h)对 HA—MBC 的影响,获取适合与 AMF 联施的最优改良方案。并通过盆栽试验,探究单菌、单炭和炭菌联作(AMF+10%B、AMF+20%B)对盐土、碱土理化性质,酶活性和甜瓜生长、光合指标的影响。[**结果**]15,75 mmol/L 盐碱胁迫时,20 g/kg AMF 与 20%HA—MBC 共同施用缓解效果最优,二者"协同增效"。一方面,HA—MBC 负载的铁氧化合物及 HA 通过增加表面官能团及孔隙率,改善土壤理化性质,而 AMF 能通过形成共生菌根,二次富集有机质、营养元素,并提升土壤酶活性,进而增加甜瓜株高根长,促进 F_v/F_m的回升与 F_0、qN 的降低;另一方面,HA—MBC 的施用能够使盐土、碱土中 AMF 侵染率分别提高 19.46%,22.72%,进一步提高 AMF 作用效果。同时,Fe^{2+}、Mg^{2+}、N 等营养元素在炭菌间能形成转化循环,提高养分利用率。150 mmol/L 盐碱胁迫时,施加低剂量 HA—MBC 仍起改良土壤、缓解胁迫的作用,而高剂量炭施加则对指标的改善起抑制作用。可能是过施 HA—MBC 时,表面官能团过度聚集有毒物质、盐离子并竞争营养元素,使 AMF 侵染率降低,削弱共生菌根现象,进而降低甜瓜光合指标。[**结论**]在添加 0.04 mmol/L $FeCl_3$、$FeSO_4$试剂,生物炭与腐殖酸配比 6∶1,交联时间 72 h 下制备的 HA—MBC 适合与 AMF 共同施用。二者联作在低、中浓度盐碱胁迫水平下可改善盐碱土理化性质和养分结构,促进甜瓜光合作用,而高浓度胁迫下过施 HA—MBC 抑制土壤指标和甜瓜光合指标的回升。

关键词: 炭菌联作;腐殖酸—磁性生物炭;改性生物炭;丛枝菌根真菌;盐碱胁迫
中图分类号:S154.39 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242-(2024)06-0352-11

Combined Effects of Humic Acid-Modified Magnetic Biochar and AMF on the Properties of Saline-Alkali Soil and Photosynthetic Parameters of Muskmelon

ZHANG Yating, LOU Xueyi, WU Jiarui, LIU Hongyuan, YE Binyu, XIAO Jiamin, LI Jiameng, MIAO Yining, CHEN Xinyan, LIU Yilin, TAN Yuyu, WANG Zhichao, LIU Peng
(*Botany Laboratory, College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang* 321004, *China*)

Abstract: [**Objective**] To improve humic acid-modified magnetic biochar (HA-MBC) and explore the combined effects of modified biochar and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the properties of saline-alkali soils and the growth of muskmelon. [**Methods**] Through response surface methodology, the effects of the ratio of magnetic biochar to humic acid (1∶4, 1∶6, 1∶8), the concentration of $FeCl_3$ and $FeSO_4$ reagents (0.02, 0.04, 0.06 g/mL), and the cross-linking duration (48, 72, 96 h) on HA-MBC were analyzed, to procure the optimum amendment scheme suitable for combined application with AMF. Moreover, by conducting pot experiments, the influence of individual fungi, individual biochar, and combined biochar-fungi (AMF+10%B, AMF+20%B) on the physicochemical properties, and enzyme activities of saline soil and alkaline soil, and the photosynthetic parameters of muskmelon were studied. [**Results**] Under 15 and 75 mmol/L saline-alkali stress, combined application of 20 g/kg AMF with 20% HA-MBC showed the best mitigation effects, with a

收稿日期:2024-09-10 **修回日期:**2024-10-07 **录用日期:**2024-11-10 **网络首发日期(**www.cnki.net**):**2024-12-27
资助项目:国家自然科学基金项目(41571049,41461010);2023 年浙江省大学生创新创业训练计划项目(S202310345048)
第一作者:张雅婷(2003—),女,硕士研究生,主要从事环境生物技术研究。E-mail:zyt5132384@163.com
通信作者:刘鹏(1965—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事植物生理、环境生态技术、植物营养等研究。E-mail:sky79@zjnu.cn

"synergistic enhancement" observed. On one hand, the iron oxides and humic acids loaded on HA-MBC improved the physical and chemical properties of soil by increasing the quantity of surface functional groups and porosity, while AMF formed symbiotic roots to further enrich organic matter and nutrients, and increase soil enzyme activities, thus increasing the height and root length of muskmelon and promoting the recovery of F_v/F_m and the reduction of F_0 and qN. On the other hand, the application of HA-MBC could increase the colonization rate of AMF in saline and alkaline soils by 19.46% and 22.72%, respectively, thus further enhancing the effects of AMF. Moreover, nutrients such as Fe^{2+}, Mg^{2+} and nitrogen could form a transformation cycle between biochar and fungi, thus improving nutrient use efficiency. Under 150 mmol/L saline-alkali stress, applying a low dose of HA-MBC still played a role in ameliorating soil and mitigating stress, while applying high doses of biochar inhibited the improvement of indicators. This might be due to excessive application of HA-MBC causing surface functional groups to aggregate toxic substances and salt ions excessively and compete for nutrients, subsequently reducing AMF colonization rates, weakening the mycorrhizal symbiosis, and hence diminishing the photosynthetic parameters of muskmelon. [**Conclusion**] HA-MBC prepared with a biochar to humic acid ratio of 6∶1 and cross-linking time of 72 h, using 0.04 mmol/L $FeCl_3$ and $FeSO_4$ reagents, is suitable for combined application with AMF. The synergistic application of HA-MBC and AMF can improve the physicochemical properties and nutrient structure of saline-alkali soil and promote the photosynthesis of muskmelon under low to medium saline-alkali stress levels, whereas excessive application of HA-MBC under high stress concentrations inhibits the improvement of soil indicators and the recovery of photosynthetic parameters in muskmelon.

Keywords: biochar-AMF interaction; humic acid-magnetic biochar; modified biochar; AMF; saline-alkali stress

Received: 2024-09-10　　**Revised**: 2024-10-07　　**Accepted**: 2024-11-10　　**Online**(www.cnki.net): 2024-12-27

盐碱土是含盐量在 0.2%以上，或土壤胶体吸附一定数量的交换性钠，碱化度在 20%以上，使作物正常生长受抑的土壤，按成分差异可分为盐土（以 NaCl、Na_2SO_4 为主）和碱土（以 $NaHCO_3$、Na_2CO_3 为主）2 种类型，全球范围内面积总计达 9.32 亿 hm^2。土壤含盐量过高使土壤孔隙度减小、养分下降，同时淋溶率、渗透压、pH 水平升高，致使土壤微生物丰富度、土壤酶活性等降低，进而抑制植物有机质、养分积累，阻碍光合作用与多项代谢[1]，造成土壤生产能力降低及生态环境退化等问题。甜瓜（*Cucumis melo* L.）为葫芦科（Cucurbitaceae），一年生蔓性草本植物，主要种植于我国新疆、华北与长江中下游等地区，具有较高的营养价值与经济效益。随着园艺生产规模扩大，由不合理灌溉、过度施肥导致的种植区土地次生盐碱化现象日益严峻，严重制约甜瓜质量与产量，需要通过施加不同类型的改良剂控制土地盐碱化程度。目前，常采用的化学与生物改良剂，如石膏、硫脱石膏、硫酸亚铁等，存在易造成二次污染，受环境因素影响大，成本昂贵，稳定性差等缺陷。因此，寻找环保高效、稳定低价的盐碱土治理方案具有重要意义。

生物炭（biochar, BC）是以生物质为原料，经热裂解后得到的新型碳复合材料，具有稳定、高比表面积和吸附能力强等特点。已有研究[2]表明，施加 BC 能够通过影响土壤微生物和植株根系，有效改善盐碱地土壤性质及植株生长；王则玉等[3]研究发现，酸化生物炭处理下土壤碱化度能够呈显著降低。然而，因生物炭碱性较高、易过分富集等问题，在实际使用过程中限制较大，常进行改性或制得复合材料后使用。罗春峰等[4]研究发现，活化铁尾砂-镁改性生物炭能有效改善盐碱土壤理化性质和养分质量分数，促进盐碱地水稻幼苗生长。丛枝菌根真菌（arbuscular mycorrhizal fungi, AMF）是广泛存在于土壤中的微生物，能与植物形成根外菌丝网络，通过分泌有机酸、菌丝分泌物等降低盐碱土 pH，减小胁迫对植物体造成的损伤，并改善根际离子环境与养分分布，优化土壤结构。吴增学等[5]研究发现，BC 和 AMF 配施在改善土壤性质和促进植物生长方面具有良好协同作用，常用于污染土壤改良等方面；王翔宇[6]也探明，BC 和 AMF 联作可缓解 Na^+ 毒害，改良滨海盐碱土并促进植物生长。目前，二者联施在盐碱土治理领域中的应用较少，且鲜有对比不同 BC 与 AMF 联作缓解效果，或改良 BC 以强化炭菌联作效应的相关研究。因此，本研究通过预试验获得适合与 AMF 共施的腐殖酸—磁性生物炭（humic acid-magnetic biochar, HA—MBC），筛选最优制备条件，并通过解析炭菌联作的影响，获取盐碱土综合治理、作物规模生产领域更为高效环保的改良方案，为改性生物炭和 AMF 联合施用提供借鉴意义。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验分为 2 个阶段，于 2022 年 8 月至 2023 年 10 月

在浙江师范大学植物逆境生理实验室进行。所采用的丛枝菌根真菌为摩西球囊霉(*Glomus mosseae* Gerdemann & Trappe),购自北京林业科学研究院,菌株以砂砾为基质,红花三叶草(*Trifolium pratense* L.)根段为宿主进行扩繁,经预试验确立施加质量比为20 g/kg。

(1)改良生物炭的制备与筛选。选取$FeCl_3$、$FeSO_4$试剂浓度(0.02,0.04,0.06 g/mL)、磁性生物炭与腐殖酸配比(MBC∶HA=1∶4,1∶6,1∶8)、交联时间(48,72,96 h)3因素3水平,设置12组分析试验和5组中心试验(用于试验误差的评估)[7],参考王欢[8]的方法制备相应组别腐殖酸—磁性生物炭(HA—MBC),用于响应面优化试验,分析磁性强弱、官能团数量和孔隙结构对炭菌联作的综合影响,以筛选出适合与AMF联合作用的HA—MBC最佳制备条件。取筛选所得HA—MBC进行表征分析,并与AMF联合施用,测量AMF侵染率以验证试验。

(2)甜瓜盆栽试验。采用"西州密17号"甜瓜品种作为供试植株,筛选若干大小均匀一致的种子,浸种8~12 h后置于28~30 ℃下催芽12 h,出芽后播种在盛有培养基质的育苗盘中。出苗后选取长势良好且相近的幼苗转移至装有土壤的塑料盆钵中,待幼苗长至三叶一心期进行胁迫处理。每隔3天浇灌盐土($NaCl$∶Na_2SO_4=1∶1)、碱土(Na_2CO_3∶$NaHCO_3$=1∶1)模拟液。浇灌时,对各组盆栽分别进行4次200 mL模拟液的浇灌,共800 mL,保持土壤水分体积分数达到田间持水量的75%。分别设置低、中、高(15,75,150 mmol/L)3个胁迫浓度,添加筛选所得HA—MBC与AMF,各浓度下设CK(空白对照)、G(AMF处理)、B_{10}(10% HA—MBC)、G+B_{10}(AMF+10% HA—MBC)、G+B_{20}(AMF+20%HA—MBC)5组,共30组,每组设3个重复。

1.2 测量项目与方法

1.2.1 改性生物炭理化性质的测定 参考HAGEMANN等[9]方法,使用Quadrasorb SI-4型表面积及孔隙度分析仪(BET)对生物炭材料的比表面积和孔隙分布进行测定;生物炭表面官能团通过傅里叶红外光谱仪测定(NEXUS670);采用ESCALAB250 Xi型X射线光电子能谱仪(Thermo Fisher Scientific,美国)测定材料表面元素成分。

1.2.2 AMF侵染率的测定 AMF侵染率的测定基于染色镜检法,参考台盼蓝染色—十字交叉法[10]。计算公式为:

菌根侵染率(%)=(观测点泡囊数目/总检测交叉点数)×100%。

1.2.3 土壤理化性质指标的测定 pH使用CHN868型pH计(Thermo Orion)测量。称取待测土壤样品约1 g(误差0.000 1 g)于消化管中,通过栾慧等[11]改良的凯氏定氮仪法检测速效N含量;采用Olsen法[12],用0.5 mol/L的碳酸氢钠(pH为8.5)提取,钼锑抗试剂显色分光光度法检测速效P含量;采用乙酸铵溶液浸提-火焰光度计法[13]测定速效K含量。参考王传杰等[14]测定土壤有机质含量。

1.2.4 土壤酶活性的测定 称取5 g土壤样品于具塞三角瓶中,加入0.5 mL甲苯,于4 ℃冰箱中放置30 min后,立刻加入25 mL 3%的冰H_2O_2水溶液,置于冰箱中1 h,再迅速加入2 mol/L冰H_2SO_4溶液25 mL,摇匀过滤。取1 mL滤液于三角瓶,加入5 mL蒸馏水和5 mL 2 mol/LH_2SO_4溶液,利用LI等[15]高锰酸钾滴定法,计算分解的H_2O_2的量,计算过氧化氢酶活性;称取5 g土样于100 mL具塞三角瓶中,在分光光度计578 nn波长处比色,根据LU等[16]苯酚—次氯酸钠比色法进行测定,计算脲酶活性;采用磷酸苯二钠比色法[17],分别在酸性(醋酸—醋酸钠缓冲液,pH=4.6)、中性(柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液,pH=7.0)、碱性(硼酸-硼酸钠缓冲液,pH=9)环境中,使用土壤磷酸酶催化磷酸苯二钠水解生成苯酚和磷酸氢二钠,通过计算24 h后1 g土壤中酚的生成量计算磷酸酶活性。

1.2.5 甜瓜生理生化指标的测定 培养7,14,21天时分别取甜瓜幼苗,用30 cm(精度为0.1 cm)直尺测量株高和根长并记录。参照LU等[18]的丙酮浸提法进行叶绿素含量分析,取新鲜叶片0.1 g,加入80%的丙酮、碳酸钙和少量石英砂,充分研磨,提取叶绿素,分别在663,645 nm波长下用比色法观测光密度值并求出叶绿素a、叶绿素b质量分数和叶绿素总量。采用德国WALZ公司生产的调制荧光仪Imaging PAM进行叶绿素荧光观测。

1.3 数据分析

试验数据采用Microsoft Excel 2022软件进行统计整理并制表,使用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),Ducan法进行多重比较(α=0.05),Design-Expert 8.0软件设计响应面优化试验,Omnic 9.0分析红外光谱图,Origin 2021软件进行作图。所有数据以平均值±标准误表示,各指标下设3次平行。

2 结果与分析

2.1 改良HA-MBC的制备

AMF侵染率与HA—MBC比表面积、孔径成正相关。在方差分析结果中,2种模型拟合程度良好,能够用于改良生物炭比表面积、孔径的预测与分析。由图1可知,试剂浓度与材料配比、交联时间间相互作用显著。对HA—MBC制备条件进行优化,得最优条件为试剂浓度0.047 g/mL,材料配比6.184∶1(MBC∶HA),交联时间72.824 h,在此条件下预测比表面积为

47.379 m^2/g,孔径为 10.590 nm。为便于实际操作,将其调整为试剂浓度 0.04 g/mL,材料配比 6∶1(MBC∶HA),交联时间 72 h。在 5 次平行验证中,试验结果均与预测值接近,验证模型良好、预测准确。

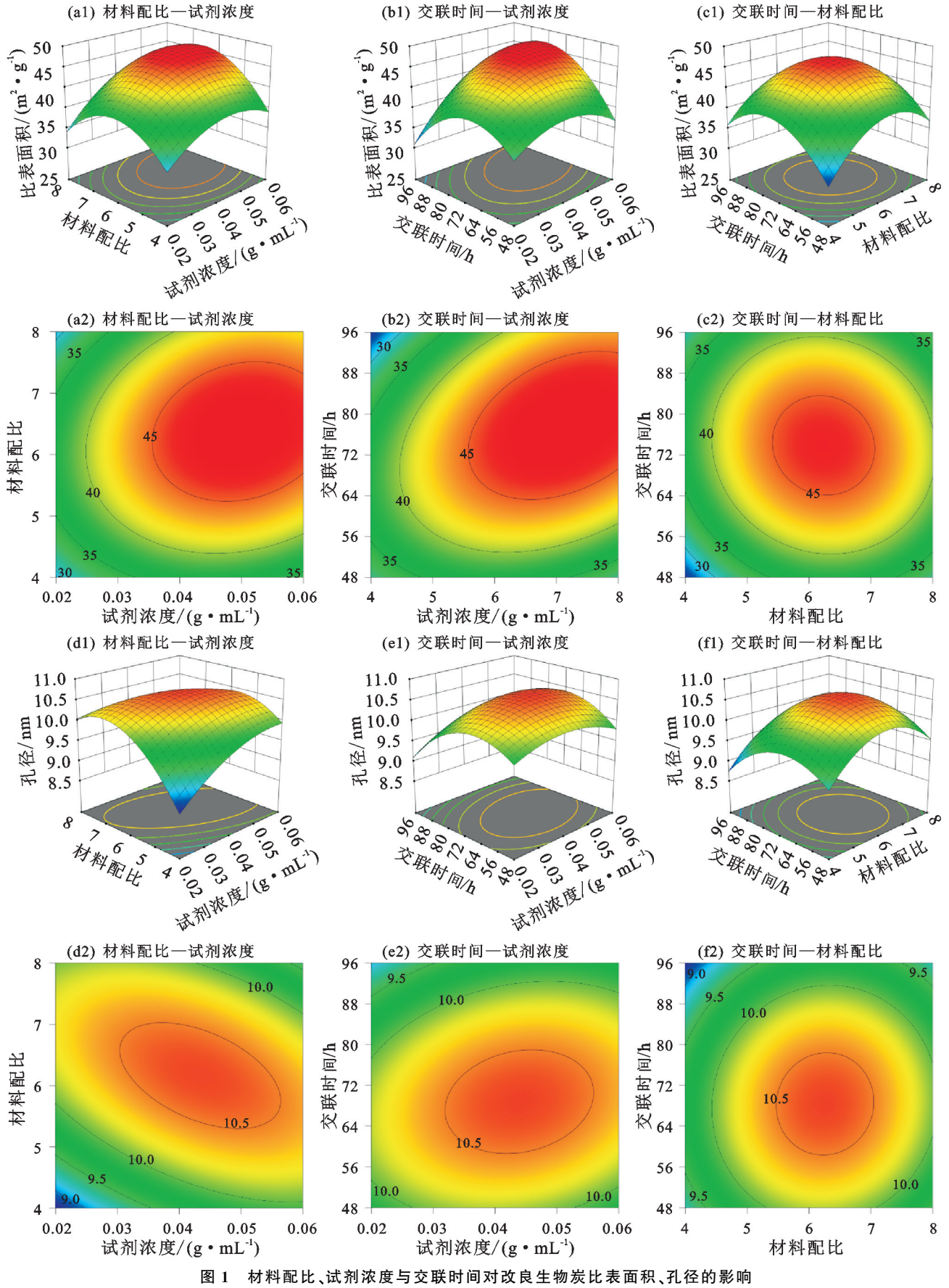

图 1　材料配比、试剂浓度与交联时间对改良生物炭比表面积、孔径的影响

Fig.1　Effects of material ratio, reagent concentration and cross-linking time on the specific surface area and pore size of the modified biochar

2.2 HA－MBC微观形貌及表征分析

对优化制备条件后获得的HA—MBC进行EDS与红外分析，由图2可知，HA—MBC中Fe、O、Ca、P元素占比分别为23.17%，22.80%，0.51%，0.27%，由此说明，其携带丰富元素，能够通过缓释促进土壤改良。同时，由红外分析可见，与BC比较，该HA—MBC含有更多含氧官能团。进行电镜扫描（图3）能直观发现，优化后的HA—MBC表面均匀分布铁氧化合物颗粒，能够增加BC表面的孔隙数量，扩大孔径以增加比表面积，HA则呈点状覆于铁氧化物表面。推测Fe_3O_4负载于BC表面，带入Fe、O元素并形成疏松的微孔结构，而HA以Fe_3O_4为媒介，借助含氧官能团嫁接至生物炭表面，进而为HA—MBC附加更多含氧官能团。

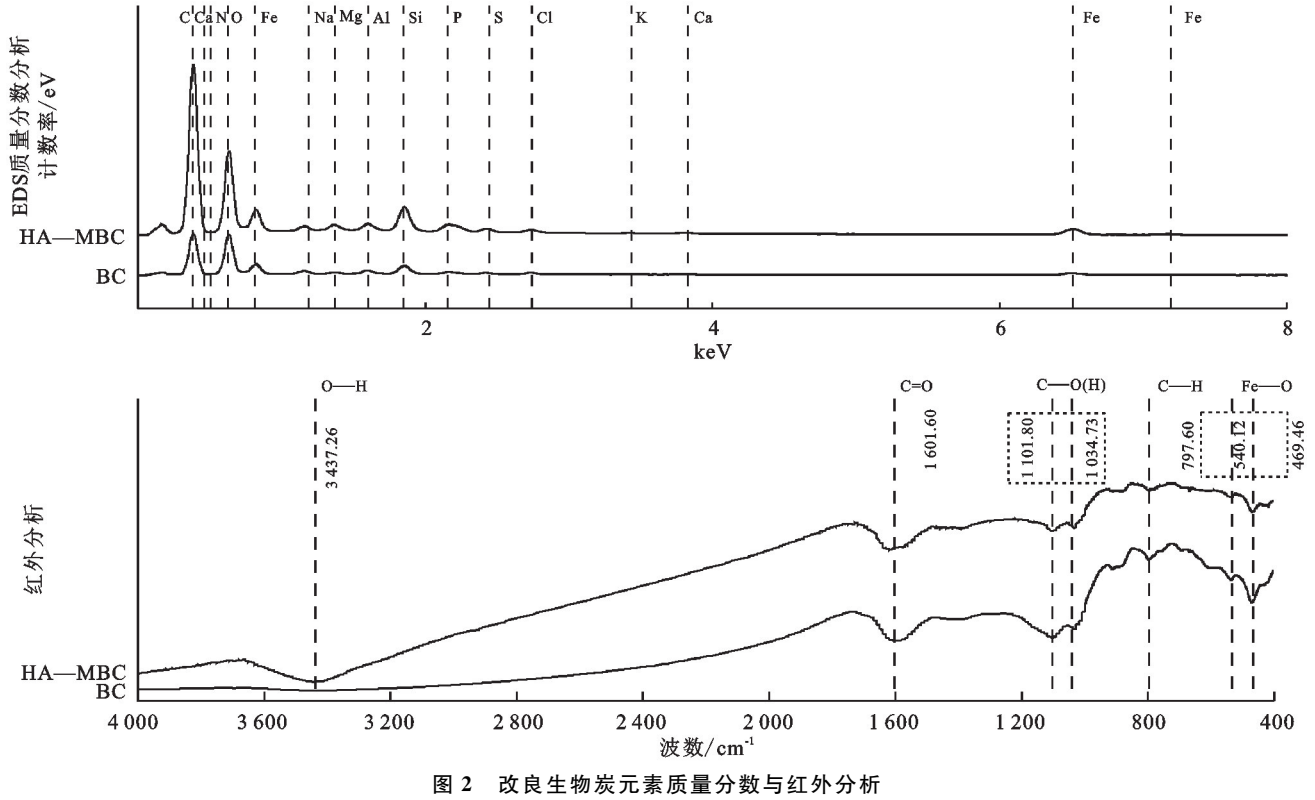

图2 改良生物炭元素质量分数与红外分析

Fig.2 Element content and infrared analysis of the modified biochar

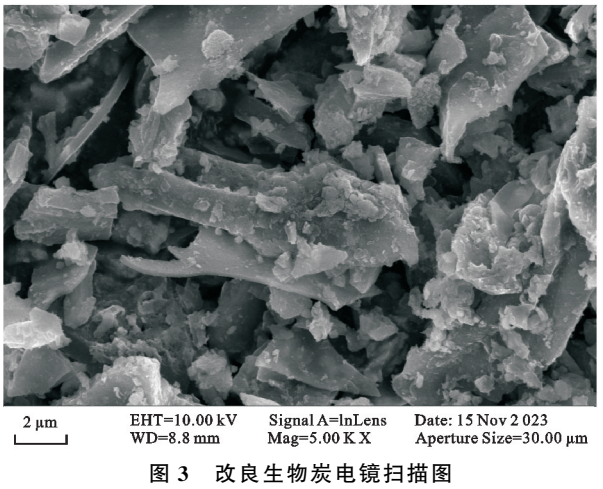

图3 改良生物炭电镜扫描图

Fig.3 SEM images of the modified biochar

2.3 HA－MBC对AMF侵染率的影响

侵染7天后，相较CK，在低浓度胁迫盐土、碱土中施加优化制得的HA—MBC或BC后，AMF对甜瓜的侵染率增幅分别为72.04%，97.03%（HA—MBC）和44.02%，68.56%（BC），且盐土、碱土中HA—MBC的AMF侵染率相较BC分别提升19.46%和22.72%。说明改良HA—MBC的施加较BC能够极为显著地提升盐土、碱土中的AMF侵染率，且在碱土中更为明显，可见改良后的HA—MBC适合与AMF共施以缓解盐碱胁迫。

2.4 炭菌联作对盐碱土土壤性质的影响

2.4.1 土壤pH 分析图4数据可证实，HA—MBC与AMF均能缓解盐碱胁迫，且二者存在“协同增效”现象。对于低、中浓度胁迫土壤，其盐碱化程度随HA—MBC施加浓度的上升而降低。其中，75 mmol/L碱胁迫浓度下$G+B_{20}$组别在21天处理后pH降幅最大，与CK相比分别下降0.91，1.48，降幅达11.52%，15.58%。在150 mmol/L碱处理下，$G+B_{20}$组相较$G+B_{10}$组别处理效果更差，相较CK仅降低8.20%。

2.4.2 土壤有机质含量 表1中B_{10}、G组中有机质含量上升，说明HA—MBC与AMF的单独作用可以提高土壤有机质含量。在中浓度胁迫下，盐、碱土$G+B_{10}$、$G+B_{20}$与CK组相比有机质含量分

别增加28.10%，11.08%（G+B_{10}）和 57.85%，33.22%（G+B_{20}），二者联施效果明显优于单独作用。而高浓度胁迫下，G+B_{10}组与此结果相似，但 G+B_{20}组中有机质含量较 G+B_{10}组别分别下降 24.79%，28.69%。

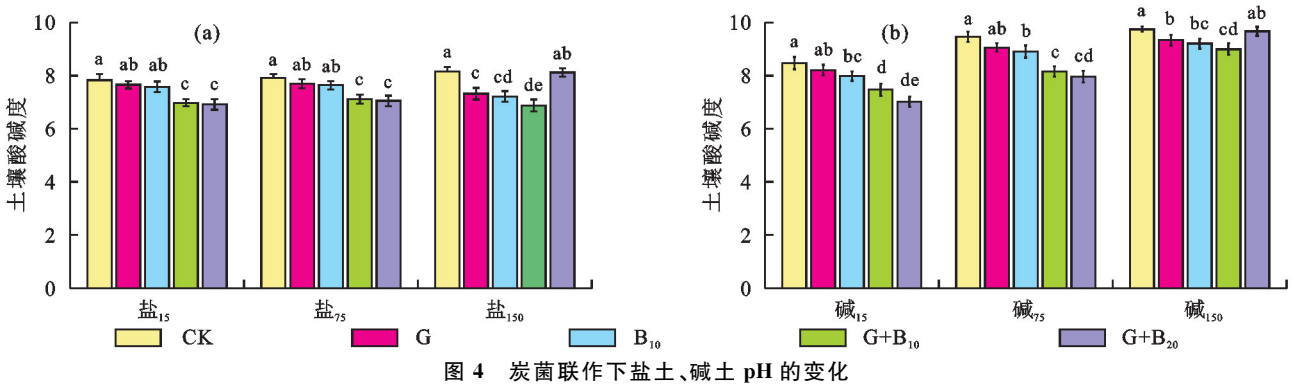

图 4　炭菌联作下盐土、碱土 pH 的变化

Fig.4　The changes in pH of saline soil and alkaline soil under the combined effect of biochar and AMF

表 1　炭菌联作下盐土、碱土有机质含量的变化

Table 1　The changes in organic matter content of saline soil and alkaline soil under the combined effect of biochar and AMF　　单位：mg/g

处理		土壤有机质含量	处理		土壤有机质含量
盐15	CK	12.37±0.54^{bc}	碱15	CK	11.87±0.51^{cd}
	G	13.20±0.57^{b}		G	12.93±0.74^{bc}
	B_{10}	12.42±0.32^{bc}		B_{10}	13.88±0.51^{b}
	G+B_{10}	15.10±0.77^{a}		G+B_{10}	14.95±0.21^{a}
	G+B_{20}	13.49±0.42^{ab}		G+B_{20}	12.99±0.52^{bc}
盐75	CK	10.47±1.02^{bc}	碱75	CK	8.17±0.43^{c}
	G	11.81±0.34^{ab}		G	11.47±0.82^{ab}
	B_{10}	10.44±0.44^{bc}		B_{10}	12.01±0.81^{ab}
	G+B_{10}	13.39±0.78^{a}		G+B_{10}	12.89±0.54^{a}
	G+B_{20}	11.58±0.23^{b}		G+B_{20}	10.88±0.71^{b}
盐150	CK	7.73±0.73^{bc}	碱150	CK	6.97±1.12^{bc}
	G	8.32±0.98^{b}		G	7.84±0.51^{b}
	B_{10}	8.42±0.49^{b}		B_{10}	8.21±0.68^{b}
	G+B_{10}	10.77±0.44^{a}		G+B_{10}	10.49±0.53^{a}
	G+B_{20}	8.10±0.32^{bc}		G+B_{20}	7.48±0.29^{bc}

注：数据的差异显著性利用单因素 ANOVA 检验中的邓肯（Duncan）分析；同列不同小写字母表示相同时期不同处理间差异达到 0.05 显著水平（$p<0.05$）。下同。

2.4.3　土壤速效 N、P、K 含量　由图 5 可知，相较单炭、单菌处理，炭菌联作可有效减少胁迫下营养元素的流失。未施加外源物质时，土壤速效 N、P、K 含量因盐碱胁迫的加剧而显著减少，在盐胁迫下，三者降幅分别可达 3.01%，40.80%，14.15%。但随着 HA—MBC 施加浓度的升高，P、K 含量递增，最大增幅分别为 61.19%（碱$_{150}$、G+B_{20}），17.03%（碱$_{15}$、G+B_{20}）。然而，N 含量在盐$_{15}$、碱$_{15}$条件下递增，在盐碱中高浓度下，随 HA—MBC 的施加呈先升后降趋势，最大值可达 117.52 mg/kg（盐$_{15}$、G+B_{20}）。

2.4.4　土壤酶活性变化　土壤酶能催化土壤中复杂的有机物质转化为简单的无机化合物，供植物吸收利用，是评价土壤肥力和生态环境质量的灵敏性生物指标[19]。由表 2 可知，3 种土壤酶活性随胁迫浓度的提高整体呈下降趋势，在较低胁迫浓度（15，75 mmol/L）下均与生物炭施加浓度呈显著正相关（$p<0.05$），而在较高胁迫浓度下活性被抑制，与 AMF 侵染率变化、土壤速效 N 含量及有机质含量有关。

2.5　炭菌联作对甜瓜生长的影响

2.5.1　甜瓜株高根长　由表 3 可知，本研究中 AMF 和 HA—MBC 单独作用可一定程度上缓解盐碱胁迫对甜瓜株高根长的抑制作用，在低、中浓度盐胁迫下，单施 HA—MBC 植株总长较 CK 组分别提高 17.34%，17.90%，单施 AMF 仅分别提高 8.77%，8.60%，而联施 G+B_{10}组植株总长分别提高 36.40%，40.41%，高浓度盐胁迫下 G+B_{10}组总长升高 16.84%，碱胁迫下趋势相似，说明盐碱胁迫条件下，二者联施存在“协同增效”现象，能显著改善盐碱胁迫对甜瓜的抑制作用，提升植株总长。然而在高浓度胁迫下添加高浓度 HA—MBC（B_{20}）时，联施反而加重胁迫影响。

2.5.2　甜瓜叶绿素含量　由图 6 可知，盐碱胁迫可导致叶绿素含量的降低，单炭处理下无明显影响，而单菌处理则起缓解作用甚至促进叶绿素含量提高。在低、中浓度胁迫（15，75 mmol/L）下，21 天时盐土、碱土中 AMF 与 HA—MBC 的共施均能促使叶绿素含量回升，相较 7 天分别增加 21.16%，27.48%（G+B_{10}）和 32.15%，34.77%（G+B_{20}），且均高于单菌处理下 18.77%，16.33%。可见 HA—MBC 与 AMF 共施能够缓解盐碱胁迫造成的叶绿素含量下降，甚至于 75 mmol/L 胁迫时，较 CK 组分别提高 3.75%（G+B_{10}），18.27%（G+B_{20}）。高浓度胁迫下 G+B_{10}效果与此相似，但 G+B_{20}表现为抑制叶绿素含量上升。

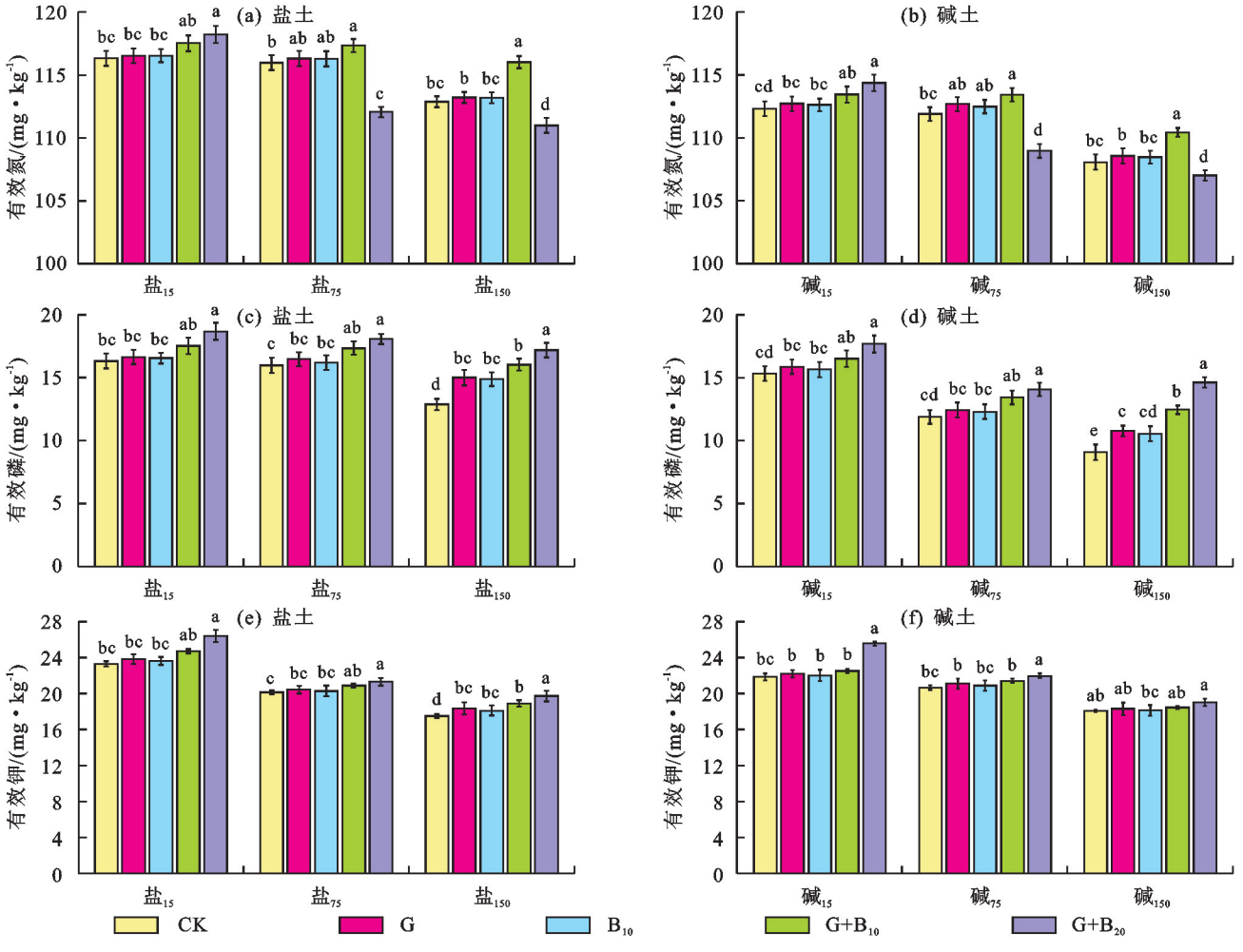

图 5 炭菌联作下盐土、碱土速效 N、P、K 含量的变化

Fig.5 The changes in bioavailable N, P, K of saline soil and alkaline soil under the combined effect of biochar and AMF

2.5.3 甜瓜荧光特性 由图 7 可知，甜瓜对低浓度盐碱胁迫具有抗性，21 天后指标变化较小。中、高浓度胁迫下，CK 组 21 天后胁迫损伤超出自主调节范围。AMF 与 HA—MBC 的单独添加均能促使各指标改善，增强植株光合稳定性，且前者优于后者。二者联作的作用效果与胁迫类型、浓度相关。15，75 mmol/L 胁迫时，盐胁迫中 G＋B_{10}、G＋B_{20} 组别处理效果均优于炭菌单独作用，且后者相较前者 F_0 分别下降 12.75%，11.97%，qN 分别下降 6.10%，7.39%，F_v/F_m 分别提高 2.74%，2.06%。碱胁迫与此大致相同，表明该条件下炭菌联作能削弱胁迫对叶绿素和光系统的破坏程度，保证光合作用正常进行。但 150 mmol/L 胁迫时，G＋B_{20} 组反而对 F_0、qN、F_v/F_m 的改善起抑制作用。

3 讨 论

3.1 改良生物炭的制备及对 AMF 的作用效果

BC 与 AMF 的联合施用已被证实在土壤改良、污染修复等方面具有协同增效作用，但其作用特点较不稳定，易随环境、生物炭原料、施用比例等的不同而改变[20]。本研究基于 BC 与 AMF 的联合作用，优化并制备适用于炭菌联作的改良 HA—MBC。本研究结果显示，盐碱胁迫时，在添加 0.04 mmol/L $FeCl_3$、$FeSO_4$ 试剂，生物炭与腐殖酸比例 6∶1，交联时间 72 h 条件下，制备的改良 HA—MBC 适合与 AMF 共同施用，相较 BC 能够提高 19.46%（盐土）和 22.72%（碱土）的 AMF 侵染率。江美琳等[21]发现，铁氧化物颗粒负载于生物炭表面会形成疏松的氧化铁聚合物微孔结构，增加整体孔径与比表面积；YANG 等[22]研究表明，HA 能够迅速以 Fe_3O_4 为媒介嫁接到生物炭表面，带入有机质和大量含氧官能团。本研究中，施用改良 HA—MBC 能够通过负载铁氧化物和 HA 带入的含氧官能团，加强对 AMF 的吸附，并通过降低土壤 pH、调节团聚体改善土壤结构，优化 AMF 生存环境。此外，还能由带入的 Fe、P、Mg 等元素，缓释营养物质，并通过增强对土壤中 HPO_3^{2-} 释放、吸附的诱导等[23]途径改善土壤离子结构，补给胁迫下 AMF 增殖所缺养分，以此提高 AMF 增殖率，促进共生菌根形成。除此之外，本研究发现，随试剂浓度、材

料配比升高,交联时间延长,改良 HA—MBC 对 AMF 侵染率的影响先增后降。可能是因为生物炭氧化铁颗粒的负载呈现不均匀分布—均匀分布—分布饱和的规律[21],且当 MBC∶HA>6∶1 时,过量 HA 覆盖铁氧化物,减小生物炭孔隙和携带元素,进而降低对 AMF 生长的促进作用。

表 2　炭菌联作下盐土、碱土中土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶酶活性变化

Table 2　The changes in soil urease, phosphatase, catalase activities of saline soil and alkaline soil under the combined effect of biochar and AMF

处理组		土壤脲酶活性/($mg \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$)	土壤磷酸酶活性/($mg \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$)	土壤过氧化氢酶活性/($ml \cdot g^{-1} \cdot 20\ min^{-1}$)
盐$_{15}$	CK	0.35 ± 0.04^{a}	1.15 ± 0.04^{a}	1.10 ± 0.04^{a}
	G	0.42 ± 0.03^{b}	1.18 ± 0.04^{a}	1.22 ± 0.03^{b}
	B_{10}	0.37 ± 0.02^{c}	1.21 ± 0.02^{c}	1.97 ± 0.03^{b}
	$G+B_{10}$	0.58 ± 0.02^{c}	1.45 ± 0.02^{c}	0.81 ± 0.02^{c}
	$G+B_{20}$	0.51 ± 0.02^{c}	1.32 ± 0.03^{b}	0.80 ± 0.02^{c}
盐$_{75}$	CK	0.17 ± 0.02^{c}	0.83 ± 0.02^{c}	0.74 ± 0.02^{b}
	G	0.33 ± 0.02^{c}	0.92 ± 0.04^{a}	0.99 ± 0.01^{c}
	B_{10}	0.28 ± 0.04^{a}	0.99 ± 0.03^{b}	0.93 ± 0.02^{b}
	$G+B_{10}$	0.64 ± 0.03^{b}	0.87 ± 0.03^{b}	1.17 ± 0.03^{a}
	$G+B_{20}$	0.47 ± 0.01^{d}	0.63 ± 0.01^{d}	0.68 ± 0.01^{c}
盐$_{150}$	CK	0.14 ± 0.01^{c}	0.50 ± 0.01^{d}	0.33 ± 0.01^{c}
	G	0.23 ± 0.02^{b}	0.57 ± 0.03^{b}	0.43 ± 0.02^{b}
	B_{10}	0.21 ± 0.02^{b}	0.63 ± 0.02^{c}	0.40 ± 0.01^{c}
	$G+B_{10}$	0.43 ± 0.04^{a}	0.89 ± 0.04^{a}	0.74 ± 0.04^{a}
	$G+B_{20}$	0.11 ± 0.02^{b}	0.23 ± 0.02^{c}	0.20 ± 0.02^{b}
碱$_{15}$	CK	0.31 ± 0.01^{c}	1.07 ± 0.02^{a}	1.01 ± 0.03^{b}
	G	0.39 ± 0.02^{b}	1.11 ± 0.01^{b}	1.13 ± 0.01^{c}
	B_{10}	0.37 ± 0.02^{b}	1.09 ± 0.02^{a}	1.08 ± 0.04^{a}
	$G+B_{10}$	0.55 ± 0.01^{c}	1.35 ± 0.02^{a}	0.79 ± 0.04^{a}
	$G+B_{20}$	0.50 ± 0.03^{a}	1.28 ± 0.02^{a}	0.73 ± 0.01^{c}
碱$_{75}$	CK	0.15 ± 0.03^{b}	0.56 ± 0.03^{b}	0.67 ± 0.03^{b}
	G	0.23 ± 0.02^{c}	0.63 ± 0.02^{c}	0.81 ± 0.01^{d}
	B_{10}	0.21 ± 0.01^{d}	0.67 ± 0.04^{a}	0.78 ± 0.03^{b}
	$G+B_{10}$	0.29 ± 0.04^{a}	0.77 ± 0.04^{a}	0.93 ± 0.04^{a}
	$G+B_{20}$	0.13 ± 0.02^{c}	0.48 ± 0.02^{c}	0.90 ± 0.02^{c}
碱$_{150}$	CK	0.07 ± 0.01^{d}	0.42 ± 0.01^{d}	0.25 ± 0.01^{c}
	G	0.13 ± 0.01^{d}	0.49 ± 0.01^{d}	0.34 ± 0.01^{c}
	B_{10}	0.09 ± 0.02^{c}	0.52 ± 0.02^{c}	0.28 ± 0.03^{b}
	$G+B_{10}$	0.16 ± 0.03^{b}	0.66 ± 0.03^{b}	0.53 ± 0.03^{b}
	$G+B_{20}$	0.03 ± 0.04^{a}	0.19 ± 0.04^{a}	0.12 ± 0.04^{a}

3.2　炭菌联作对盐碱土性质及甜瓜生长的影响

已有研究[24]证明,施加 BC 能够促进土壤团聚体的形成,改良盐碱土性质和养分结构,进而影响植物生长。施加 AMF 则能够维护盐碱土 N、P、K 循环,并对提高土壤微生物活跃性、缓解盐碱胁迫对植株根系的损伤有重要作用[20]。本研究结果与此相似。在 15,75 mmol/L 胁迫下,于盐碱土土壤性质而言,炭菌联作能使盐土、碱土 pH 回落,有机质及速效 N、P、K 质量分数显著增加。于甜瓜生长而言,能够提高甜瓜总长,降低非光化学猝灭系数 qN,并提高叶绿素含量、初始荧光 F_0、F_v/F_m。同时,研究结果显示,各组处理效果均为 AMF+20% HA—MBC>AMF+10% HA—MBC>AMF>10% HA—MBC。与王岩等[25]BC 和 AMF 共施相较单独施加 BC 或 AMF 对辣椒生长促进效果更显著的结论相同。

表 3　炭菌联作下盐土、碱土中甜瓜株高、根长的变化

Table 3　The changes in muskmelon plant height, root length in saline soil and alkaline soil under the combined effect of biochar and AMF　　单位:cm

处理		株高	根长
盐$_{15}$	CK	7.48 ± 0.54^{bc}	26.37 ± 2.52^{bc}
	G	8.86 ± 0.33^{ab}	30.86 ± 2.34^{ab}
	B_{10}	7.96 ± 0.62^{b}	28.96 ± 2.67^{b}
	$G+B_{10}$	10.27 ± 1.12^{a}	35.75 ± 3.12^{a}
	$G+B_{20}$	10.32 ± 0.52^{a}	34.88 ± 1.53^{a}
盐$_{75}$	CK	6.65 ± 1.32^{c}	25.47 ± 1.28^{bc}
	G	8.93 ± 0.32^{b}	28.93 ± 2.29^{b}
	B_{10}	7.44 ± 0.44^{bc}	27.44 ± 1.43^{bc}
	$G+B_{10}$	10.66 ± 0.93^{a}	34.42 ± 1.93^{a}
	$G+B_{20}$	9.47 ± 0.31^{b}	33.12 ± 2.31^{ab}
盐$_{150}$	CK	4.73 ± 1.31^{ab}	21.73 ± 2.31^{bc}
	G	5.32 ± 0.88^{a}	25.32 ± 1.93^{ab}
	B_{10}	5.02 ± 0.29^{a}	23.02 ± 2.28^{ab}
	$G+B_{10}$	4.15 ± 0.44^{b}	26.77 ± 2.44^{a}
	$G+B_{20}$	3.73 ± 1.12^{ab}	19.73 ± 1.12^{bc}
碱$_{15}$	CK	6.58 ± 0.78^{b}	26.07 ± 2.52^{b}
	G	7.21 ± 1.22^{ab}	30.21 ± 2.18^{ab}
	B_{10}	6.88 ± 0.31^{b}	26.88 ± 3.34^{b}
	$G+B_{10}$	8.27 ± 0.51^{a}	33.75 ± 2.52^{a}
	$G+B_{20}$	8.02 ± 0.52^{ab}	32.88 ± 2.52^{ab}
碱$_{75}$	CK	6.39 ± 0.53^{b}	25.17 ± 1.53^{b}
	G	6.97 ± 1.22^{ab}	29.97 ± 3.22^{ab}
	B_{10}	6.51 ± 0.51^{ab}	25.01 ± 2.47^{b}
	$G+B_{10}$	7.94 ± 0.94^{a}	31.75 ± 2.07^{a}
	$G+B_{20}$	7.89 ± 0.54^{a}	31.88 ± 2.52^{a}
碱$_{150}$	CK	5.12 ± 1.13^{ab}	22.97 ± 2.11^{ab}
	G	5.84 ± 0.51^{a}	23.84 ± 2.51^{ab}
	B_{10}	5.21 ± 0.98^{ab}	23.21 ± 2.32^{ab}
	$G+B_{10}$	6.07 ± 0.83^{a}	24.79 ± 2.28^{a}
	$G+B_{20}$	4.93 ± 0.44^{ab}	21.48 ± 1.38^{ab}

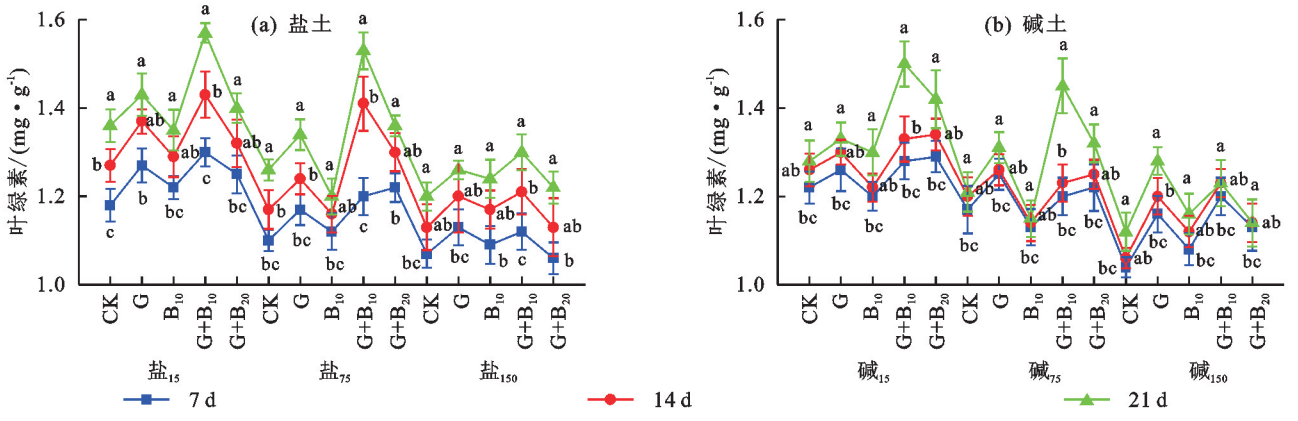

图 6 炭菌联作下盐土、碱土中甜瓜叶绿素含量的变化

Fig.6 The changes in muskmelon plant height, root length in saline soil and alkaline soil under the combined effect of biochar and AMF

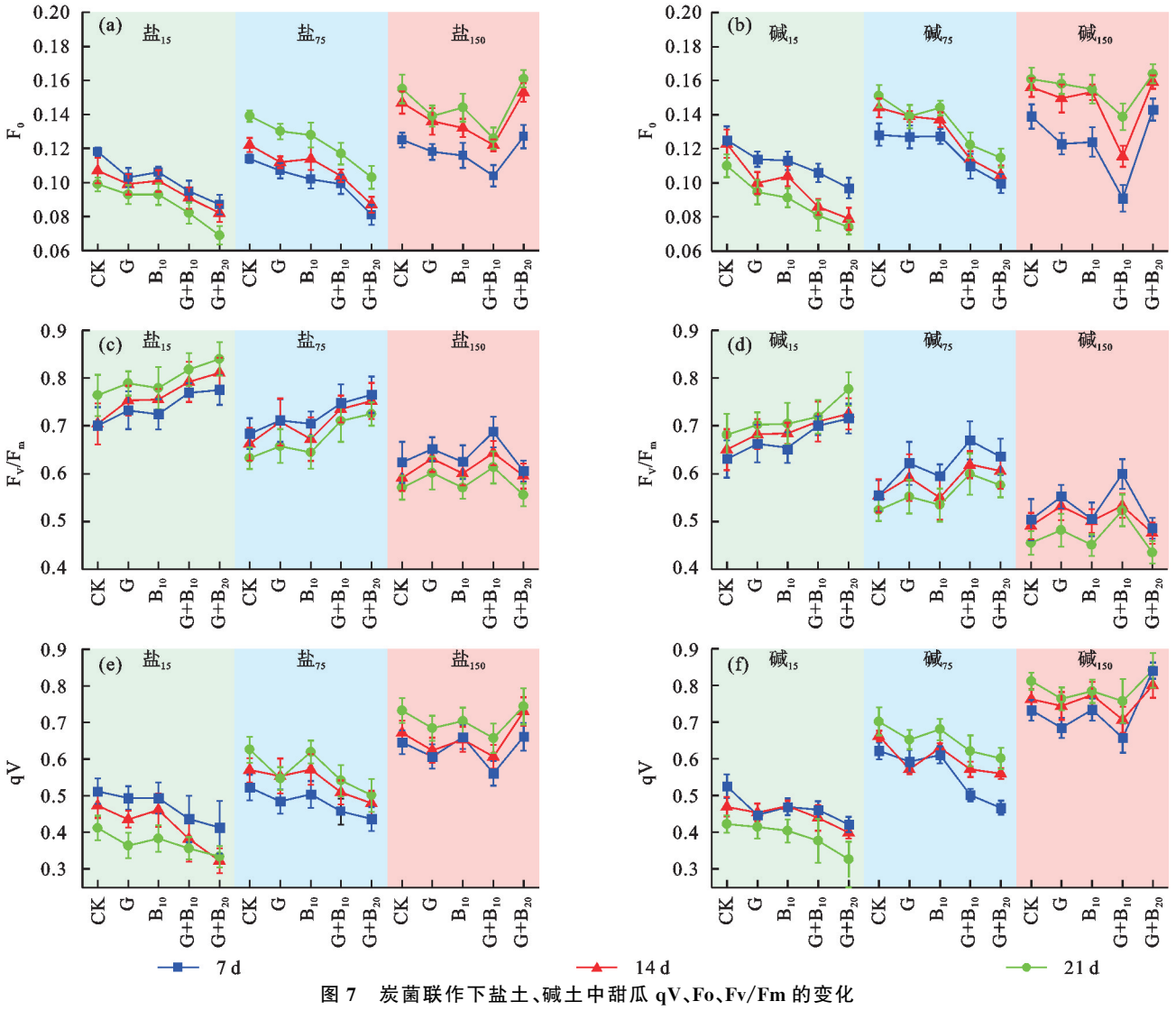

图 7 炭菌联作下盐土、碱土中甜瓜 qV、Fo、Fv/Fm 的变化

Fig.7 The changes in muskmelon plant height, root length in saline soil and alkaline soil under the combined effect of biochar and AMF

改良 HA—MBC 与 AMF 均能改善土壤性质，促进甜瓜生长。改良 HA—MBC 能够借助表面含氧官能团，结合磷酸根离子，降低溶液中的 H^+，减少 P 损失并提升 Ca^{2+} 溶解度以代换 Na^+，使土壤局部 pH 下降，速效 P 质量分数上升[7]；通过 HA 与铁氧化物带入丰富有机质，缓释 Ca、Mg、K、P 等元素；还能通过高比表面积和孔隙率增加土层氧气分数，为土壤微生物提供生存空间，进而保持土壤中氮素不被淋失，并促进氨化、硝化反应，提高速效 N 含量。而 AMF 能通过共生菌根增大根系与土壤的接触面积，帮助甜瓜有效利用水分和营养元素，同时抑制对 Na^+、H^+ 等吸收，调节渗透物质，提高植株抗氧化酶活性以减小高

pH 对根系的损伤，协同促进植株主根的伸长；通过产生挥发性有机酸、刺激根际分泌物生成以加强植株对 N、K 的利用[24-25]；菌根菌丝网络可减少离子流失、优化根际环境，提高甜瓜对盐碱土中营养元素的利用率；另一方面，改良 HA—MBC 与 AMF 之间存在相互作用，并对土壤改良、甜瓜生长产生一定影响。首先，改良 HA—MBC 能够促进 AMF 侵染率的提升，强化 AMF 作用。其次，炭菌联作会引起根际激发效应[26]，二者共同调控微生物群落转变和代谢，加速营养转化，并提升土壤中脲酶、磷酸酶及过氧化氢酶活性等。此外，部分营养元素能在 HA—MBC 与 AMF 间形成转化或循环，如 AMF 能外泌球囊霉素螯合 HA—MBC 缓释的 Fe、Mg 等元素，转化为可利用的 Fe^{2+}、Mg^{2+}，削弱胁迫对甜瓜光系统损伤；HA—MBC 的含氧官能团结合氨态氮，AMF 则刺激根际分泌物加强 N 转化，提升土壤速效 N 含量等。基于相互作用及对环境的影响，实现“协同增效”。

除此之外，本研究发现，在 150 mmol/L 胁迫下，HA—MBC 与 AMF 共施对土壤性质及甜瓜光合指标表现为“低促高抑”，即在施加 AMF＋10% HA—MBC 时，甜瓜总长、叶绿素含量及光合指标相较 CK 提升显著。同时，土壤 pH 下降，有机质、速效 P、K、N 含量明显回升，土壤中脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性显著提高。但施加 AMF＋20% HA—MBC 时，各指标缓解受阻，甚至出现小幅下降。可能是因为高浓度胁迫致使植株根系不可逆损伤[26]，也可能是过施 HA—MBC 使表面官能团过度富集有害物质、H^+、Na^+ 等，引起渗透胁迫、离子毒性，致使营养离子失衡更严重，抑制 AMF 生长增殖，减弱甜瓜胁迫缓解作用，叶片叶绿素合成受阻，光合能力下降，导致总长减小，同时阻碍硝化作用降低土壤速效 N 含量。然而，该条件下土壤有机质及速效 P、K 含量仍显著上升，可能是因为 HA—MBC 表面负载 HA 且自身含有充足有机质及 P、K 元素，能够缓释补充土壤，故速效 P、K 含量与 HA—MBC 施加量成正比，受 AMF 影响较小。此外，尽管本研究验证改良 HA—MBC 以强化炭菌联作效果的可行性，并探究炭菌联作对盐碱土改良、甜瓜生长的影响，但在此过程中，仍有待进一步探明，生物炭、植物体、AMF 与土壤环境间的作用机理，并综合对作物生长与炭菌联作机制的分析，筛选最适于改良盐碱土的改性生物炭制备方案。

4　结 论

（1）盐碱胁迫会降低土壤 pH，减少土壤有机质及速效 P、N、K 含量，限制土壤中脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性，影响通气性、透水性和土壤保肥能力。同时，还通过降低 Fe^{2+}、Mg^{2+} 溶解度，破坏甜瓜根系结构、阻碍离子交换，进而致使甜瓜叶绿素含量下降，qN 升高，F_0、F_v/F_m 显著降低，光系统结构受损，光合能力下降。

（2）适合与 AMF 共同施用的改良 HA—MBC 制备条件为 0.04 mmol/L $FeCl_3$、$FeSO_4$，磁性生物炭与腐殖酸配比 6∶1，交联时间 72 h。该条件下，改良 HA—MBC 能通过负载铁氧化合物、HA，显著提高孔隙率与比表面积，增加表面羟基、羧基等含氧官能团。同时，内含的 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 可置换土壤中 Na^+、HPO_3^{2-}，缓释有机质及自身 Fe、P 等元素，以此提高 AMF 侵染率，缓解盐碱胁迫损伤。

（3）HA—MBC 与 AMF 共施在 15，75 mmol/L 胁迫水平下存在“协同增效”现象。一方面，HA—MBC 能够改善土壤理化性质及养分结构，并促进共生菌根形成，提高甜瓜抗性；另一方面，部分营养元素在炭菌间能够形成转化和循环，提高元素利用率。二者联作能够降低土壤 pH，提高有机质与速效 N、P、K 含量，进而提高甜瓜株高和根长。同时，带入 Fe、Mg 等元素，缓解盐碱胁迫下甜瓜叶绿素含量、荧光指标的下降。各组处理效果表现为 AMF＋20% HA—MBC＞AMF＋10% HA—MBC＞AMF＞10% HA—MBC。

（4）在 150 mmol/L 胁迫水平下，HA—MBC 与 AMF 的共同施用存在“低促高抑”现象。当施加 AMF＋20% HA—MBC 时，因表面官能团吸附过量有毒物质、竞争营养元素，引起 AMF 侵染率降低，影响菌根共生体系的形成，进而降低土壤 pH 与速效 P、K 含量，抑制胁迫的缓解，加剧盐碱胁迫对甜瓜总长、叶绿素含量与光合指标的抑制。

参考文献：

[1]　ABD EL-HALIM A E H A, SALAMA A M, IBRAHIM M M, et al. Nano-gypsum in low dose improves the physicochemical properties of saline-sodic soil[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2023, 69(12): 2286-2299.

[2]　ZHAO Z R, LIU L, SUN Y, et al. Combined microbe-plant remediation of cadmium in saline-alkali soil assisted by fungal mycelium-derived biochar[J]. Environmental Research, 2024, 240(Pt 2): e117424.

[3]　王则玉，马兴旺，李杨，等.不同酸化生物炭用量对滴灌棉田盐碱土水盐运移的影响[J].灌溉排水学报，2024，43(3)：33-38.
WANG Z Y, MA X W, LI Y, et al. Effects of acidified biochar amendment on water and salt movement in saline-alkali soil in drip-irrigated cotton field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(3): 33-38.

[4]　罗春峰，张晓蓉，巩宗强，等.活化铁尾砂与镁改性生物

炭配施对水稻幼苗生长及盐碱土性质的影响[J].农业环境科学学报,2024,43(1):68-78.
LUO C F, ZHANG X R, GONG Z Q, et al. Effect of activated iron tailings and magnesium-modified biochar blending on rice seedling growth and saline-alkali soil properties[J].Journal of Agricultural and Environmental Science,2024,43(1):68-78.

[5] 吴增学,刘晶静,马文丹.生物炭和丛枝菌根真菌配施强化重金属污染土壤植物修复研究进展[J].环境污染与防治,2024,46(7):1040-1046.
WU Z X, LIU J J, MA W D. Research progress on heavy metal contaminated soil phytoremediation enhanced by combining biochar and arbuscular mycorrhizal fungi[J].Environmental Pollution and Control,2024,46(7):1040-1046.

[6] 王翔宇.生物炭与丛枝菌根真菌共同改良滨海盐碱土促进植物生长的研究[D].山东 青岛:中国海洋大学,2019.
WANG X Y. Promotion of plant growth of biochar together with arbuscular mycorrhizal fungi[D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China,2019.

[7] 马啸,熊巧,周香君,等.赤铁矿改性生物炭回收水中磷及其作为磷肥的效果[J].农业工程学报,2023,39(22):216-225.
MA X, XIONG Q, ZHOU X J, et al. Phosphate reclamation from water using biochar modified with hematite and its application as soil phosphorus fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(22):216-225.

[8] 王欢.腐殖酸—磁性生物炭对轻度盐碱地修复及植物生长特性的影响机理研究[D].上海:东华大学,2022.
WANG H. Mechanism of humic acid-magnetic biochar on mild salinity-alkali field remediation and plant growth characteristics[D]. Shanghai: Donghua University,2022.

[9] HAGEMANN N, SUBDIAGA E, ORSETTI S, et al. Effect of biochar amendment on compost organic matter composition following aerobic composting of manure[J].The Science of the Total Environment,2018,613/614:20-29.

[10] CHEN W L, SHAN W S, NIU T T, et al. Insight into regulation of adventitious root formation by arbuscular mycorrhizal fungus and exogenous auxin in tea plant (*Camellia sinensis* L.) cuttings[J]. Frontiers in Plant Science,2023,14:e1258410.

[11] 栾慧,刘红,高一娜,等.土壤速效氮测定方法的改进[J].湖南农业科学,2017(3):88-89.
LUAN H, LIU H, GAO Y N, et al. Study on the determination method of soil alkali hydrolysis nitrogen[J].Hunan Agricultural Sciences,2017(3):88-89.

[12] HOSSAIN M Z, BAHAR M M, SARKAR B, et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant[J].Biochar,2020,2(4):379-420.

[13] BAZARGAN K, MARZI M, HASHEMINASAB K S, et al. Optimizing ammonium acetate procedure for determining available potassium in Iranian calcareous soils, testing the concentration and contact time[J]. Journal of Soil Science Society of Iran,2022,1(1):125-136.

[14] 王传杰,王齐齐,徐虎,等.长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征[J].生态学报,2018,38(11):3848-3858.
WANG C J, WANG Q Q, XU H, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry characteristics of bulk soil, organic matter, and soil microbial biomass under long-term fertilization in cropland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(11):3848-3858.

[15] LI F, CHOONG T S Y, SOLTANI S, et al. Investigation of glyphosate removal from aqueous solutions using fenton-like system based on calcium peroxide[J]. Processes,2022, 10(10):e2045.

[16] LU Q, LI C L, WU G S. Insight into the inhibitory effects of *Zanthoxylum nitidum* against *Helicobacter pylori urease* and jack bean urease: Kinetics and mechanism[J]. Journal of Ethnopharmacology,2020,249:e112419.

[17] 陈佳琦,吴海燕,姚琳,等.基于溶胶-凝胶包埋的蛋白磷酸酶抑制比色法快速检测腹泻性贝类毒素[J].分析化学,2018,46(8):1261-1268.
CHEN J Q, WU H Y, YAO L, et al. Rapid determination of diarrhetic shellfish poisoning in shellfish by colorimetric protein phosphatase inhibition assay based on immobilization of protein phosphatase 2A in sol-gel[J].Chinese Journal of Analytical Chemistry,2018,46(8):1261-1268.

[18] LU H S, LIU Y Q, LIU W J, et al. Isolation, identification of Chlorella pyrenoides from aquaculture wastewater and its purification of wastewater[J]. Editorial Office of Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(4):273-277.

[19] 韦莉莉,卢昌熠,丁晶,等.丛枝菌根真菌参与下植物-土壤系统的养分交流及调控[J].生态学报,2016,36(14):4233-4243.
WEI L L, LU C Y, DING J, et al. Functional relationships between arbuscular mycorrhizal symbionts and nutrient dynamics in plant-soil-microbe system[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(14):4233-4243.

[20] 王红萍,步连燕,陈文峰,等.功能菌剂与生物炭配施对沙化土壤的影响[J].水土保持学报,2023,37(1):345-353.
WANG H P, BU L Y, CHEN W F, et al. Effects of combined application of functional microbial agents and biochar on sandy soil[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(1):345-353.

[21] 江美琳,金辉,邓聪,等.生物炭负载 Fe_3O_4 纳米粒子的制备与表征[J].农业环境科学学报,2018,37(3):592-597.
JIANG M L, JIN H, DENG C, et al. Preparation and characterization of nanoparticles containing Fe_3O_4 cores in biochar[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018,37(3):592-597.

(下转第371页)

126-130.
XUE Y F, ZHANG H, XIA H Y, et al. Effect of different N forms on the dry weight and N accumulation of maize seedlings[J].Journal of Maize Sciences,2016,24(6):126-130.

[20] 李春春,高玉红,郭丽琢,等.氮素形态配比对玉米氮素积累及转运的影响[J].玉米科学,2018,26(1):134-141.
LI C C, GAO Y H, GUO L Z, et al. Effects of different forms and ratios of nitrogen on nutrient accumulation and transfer of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows of maize[J].Journal of Maize Sciences,2018,26(1):134-141.

[21] WANG P, WANG Z K, SUN X C, et al. Interaction effect of nitrogen form and planting density on plant growth and nutrient uptake in maize seedlings[J].Journal of Integrative Agriculture,2019,18(5):1120-1129.

[22] WANG X L, SUN R H, WU D, et al. Increasing corn compensatory growth upon post-drought rewatering using ammonia-oxidising bacterial strain inoculation[J]. Agricultural Water Management,2021,256:e107066.

[23] 王子豪,尹光华,谷健,等.浅埋滴灌水氮钾互作对春玉米水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2022,36(4):316-324.
WANG Z H, YIN G H, GU J, et al. Effects of water, nitrogen and potassium interaction on water use efficiency of spring maize under shallow-buried drip irrigation[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(4):316-324.

[24] 乔云发,苗淑杰,韩晓增.氮素形态对大豆根系形态性状及释放 H^+ 的影响[J].大豆科学,2006,25(3):265-269.
QIAO Y F, MIAO S J, HAN X Z. Effects of nitrogen forms on the root morphology and proton extrusion in soybean[J].Soybean Science,2006,25(3):265-269.

[25] 刘爱忠,董合林,裴亮只,等.氮素形态对不同钾效率基因型棉花钾素吸收利用及根系形态的影响[J].新疆农业科学,2017,54(6):998-1007.
LIU A Z, DONG H L, PEI L Z, et al. Effects of nitrogen forms for different cotton genotypes on the potassium absorption and utilization and root morphology[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2017,54(6):998-1007.

[26] HEBERLING J M, FRIDLEY J D. Invaders do not require high resource levels to maintain physiological advantages in a temperate deciduous forest[J]. Ecology, 2016, 97(4): 874-884.

[27] DINÇ E, CEPPI M G, TÓTH S Z, et al. The chl a fluorescence intensity is remarkably insensitive to changes in the chlorophyll content of the leaf as long as the chl a/b ratio remains unaffected[J].Biochimica et Biophysica Acta,2012,1817(5):770-779.

[28] 许楠,张会慧,朱文旭,等.氮素形态对饲料桑树幼苗生长和光合特性的影响[J].草业科学,2012,29(10):1574-1580.
XU N, ZHANG H H, ZHU W X, et al. Effects of nitrogen form on seedling growth and its photosynthetic characteristics of forage mulberry[J]. Pratacultural Science, 2012,29(10):1574-1580.

[29] 唐忠厚,李洪民,张爱君,等.甘薯叶光合特性与块根主要性状对氮素供应形态的响应[J].植物营养与肥料学报,2013,19(6):1494-1501.
TANG Z H, LI H M, ZHANG A J, et al. Responses of nitrogen supply forms on leaf photosynthetic characteristics and root characters of sweetpotato[J].Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2013,19(6):1494-1501.

[30] 李瑞.化肥减施对设施蔬菜土壤性质及关键污染因子的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
LI R. Effects of chemical fertilizer reduction on soil properties and key pollution factors of greenhouse vegetables [D].Harbin: Northeast Agricultural University,2019.

(上接第 362 页)

[22] YANG F, DU Q, SUI L, et al. One-step fabrication of artificial humic acid-functionalized colloid-like magnetic biochar for rapid heavy metal removal[J]. Bioresource Technology,2021,328:e124825.

[23] 曾凤美,孙思佳,孙恩惠,等. Fe/La 定向修饰凹凸棒土稻壳基颗粒成型生物炭:磷酸盐吸附行为与机制[J].环境科学学报,2022,42(7):279-289.
ZENG F M, SUN S J, SUN E H, et al. Fe/La directed modification of rice hull-based particles to form biochar: Phosphate adsorption behavior and mechanism[J].Journal of Environmental Science,2022,42(7):279-289.

[24] 赵维彬,王松,刘玲玲,等.生物炭改良盐碱地效果及其对植物生长的影响研究进展[J].土壤通报,2024,55(2):551-561.
ZHAO W B, WANG S, LIU L L, et al. Effect of biochar amendment on saline-alkaline soil amelioration and plant growth: A literature review[J].Chinese Journal of Soil Science,2024,55(2):551-561.

[25] 王岩,周鹏,白立伟,等.生物炭和 AM 真菌配施对连作辣椒生长和土壤养分的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(10):1600-1608.
WANG Y, ZHOU P, BAI L W, et al. Effects of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of continuous cropping pepper and soil nutrient status[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2020,28(10):1600-1608.

[26] WU S L, FU W, RILLIG M C, et al. Soil organic matter dynamics mediated by arbuscular mycorrhizal fungi-an updated conceptual framework[J]. The New Phytologist,2024,242(4):1417-1425.