



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

施用生物质炭对桃园土壤肥力及黄桃产量和品质的影响

钱九盛, 谢文逸, 何中华, 刘晓雨, 张旭辉, 郑聚锋, 李恋卿, 潘根兴

引用本文:

钱九盛, 谢文逸, 何中华, 刘晓雨, 张旭辉, 郑聚锋, 李恋卿, 潘根兴. 施用生物质炭对桃园土壤肥力及黄桃产量和品质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 680–688.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0416>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响

刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 张艺潇, 孟军

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 544–551 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0143>

生物炭对烤烟成熟期根际真菌群落结构的影响及功能预测分析

李茂森, 王丽渊, 杨波, 刘福童, 张勇江, 任天宝, 张福建

农业资源与环境学报. 2022, 39(5): 1041–1048 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0318>

生物炭基土壤调理剂对酸性菜田土壤的改良效果

杨慧豪, 郭秋萍, 黄帮裕, 陈海斌, 潘晓莹, 范如芹, 杜建军

农业资源与环境学报. 2023, 40(1): 15–24 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0719>

施用腐植酸和生物肥对草莓品质、产量及土壤农化性状的影响

刘继培, 刘唯一, 周婕, 李桐, 赵跃, 张蒙

农业资源与环境学报. 2015(1): 56–61 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0205>

生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响

王悦满, 高倩, 薛利红, 杨林章, 李辉信, 冯彦房

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 58–65 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0162>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

钱九盛, 谢文逸, 何中华, 等. 施用生物质炭对桃园土壤肥力及黄桃产量和品质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 680–688.

QIAN J S, XIE W Y, HE Z H, et al. Effect of biochar amendment on orchard soil fertility and yellow peach yield and quality[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 680–688.

施用生物质炭对桃园土壤肥力及黄桃产量和品质的影响

钱九盛¹, 谢文逸¹, 何中华², 刘晓雨¹, 张旭辉^{1*}, 郑聚锋¹, 李恋卿¹, 潘根兴¹

(1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095; 2. 苏州太龙生态农业发展有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要:为探究不同原料生物质炭对桃园土壤肥力和黄桃产量的影响,以黄桃园为研究对象,设置当地习惯施肥(CK)与分别配施 20 t·hm⁻²水稻秸秆生物质炭(RB)、小麦秸秆生物质炭(WB)、杉木生物质炭(FB)4种处理,通过田间试验研究了不同处理对土壤理化性质、土壤胞外酶活性、各生育时期叶片及果实养分含量、黄桃产量及品质的影响。结果表明:不同生物质炭处理下土壤有机质含量显著增加,而铵态氮、硝态氮和有效磷含量均显著降低,其中WB处理较CK处理显著增加了土壤pH、阳离子交换量和全氮含量,增幅分别为6.7%、15.4%和17.6%。生物质炭施用显著提高了土壤酶活性,归一化酶活性显著增加80.0%~96.0%。不同生物质炭施用对土壤肥力影响不同,WB处理可显著提高土壤肥力指数17.8%。除RB处理较CK显著降低硬核期果实氮含量外,WB和FB处理均促进了植株地上部对养分的吸收,相较于CK,WB处理显著提高成熟期叶片钾含量、膨大一期果实磷含量以及膨大一期和硬核期果实钾含量;FB处理显著提高了膨大二期叶片磷含量、成熟期叶片钾含量,以及膨大一期果实氮、磷含量和成熟期果实磷含量。WB处理黄桃单果质量降低了12.7%,可滴定酸含量降低了13.8%,但黄桃总产量、可溶性糖含量及糖酸比无显著变化。研究表明,生物质炭施用可通过提高土壤pH、有机质含量和土壤酶活性来改善土壤肥力,促进植株地上部养分吸收,但短期内对黄桃产量和品质的影响较小。

关键词:黄桃;生物质炭;土壤肥力;产量;品质

中图分类号:S662.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)03-0680-09

doi: 10.13254/j.jare.2022.0416

Effect of biochar amendment on orchard soil fertility and yellow peach yield and quality

QIAN Jiusheng¹, XIE Wenyi¹, HE Zhonghua², LIU Xiaoyu¹, ZHANG Xuhui^{1*}, ZHENG Jufeng¹, LI Lianqing¹, PAN Genxing¹

(1. Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Suzhou Tailong Ecological Agriculture Development Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: Our objective was to investigate the effect of different biochar soil amendments on soil fertility and the fruit yield of yellow peach, to provide a scientific basis for biochar use in peach cultivation. We conducted a field experiment to investigate the effect of biochar amendments on the soil physicochemical properties, soil enzyme activity, and leaf and fruit nutrients of peach trees at different growth stages, and on the yellow peach yield and quality in an orchard. We designed four fertilization treatments including the conventional fertilization regime in the local area as the control (CK) and the application of three biochars from rice straw (RB), wheat straw (WB), and Chinese fir (FB), separately. In the biochar treatments, we applied the biochar at the rate of 20 t·hm⁻² with conventional fertilizers. The results showed that all biochar amendments significantly increased soil organic matter content, whereas they significantly decreased ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and available phosphorus contents. Compared with the CK treatment, the WB treatment significantly increased soil pH, cation exchange capacity, and total nitrogen content by 6.7%, 15.4% and 17.6%, respectively. Biochar amendment significantly increased normalized enzyme activity by 80.0%–96.0%. The responses of soil fertility varied among the biochars. Compared with the CK treatment, the WB treatment significantly increased the soil fertility index by 17.8%. In addition to RB treatment significantly

收稿日期: 2022-06-28 录用日期: 2022-09-09

作者简介: 钱九盛(1997—), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 研究方向为土壤肥力。E-mail: 2019103088@njau.edu.cn

*通信作者: 张旭辉 E-mail: xuhuizhang@njau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471193)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41471193)

<http://www.aed.org.cn>

decreased the fruit nitrogen content at the hard-core stage compared with CK treatment, WB and FB treatment promoted the uptake of nutrients by the trees. Compared with the CK treatment, the WB treatment significantly increased the leaf potassium content at the mature stage, fruit phosphorus content at the first expanding stage, and fruit potassium content at the first expanding and hard-core stages. The FB treatment significantly increased leaf phosphorus content at the second expanding stage, leaf potassium content at the mature stage, fruit nitrogen and phosphorus contents at the first expanding stage, and fruit phosphorus content at the mature stage. Compared with the CK treatment, the WB treatment significantly reduced single fruit mass by 12.7% and titratable acid content by 13.8%, but had no significant effect on fruit production, soluble sugar content, or sugar-to-acid ratio of yellow peaches. In conclusion, biochar amendments can improve soil properties through increasing the pH, organic matter content, and enzyme activity, and by promoting nutrient uptake; however they have little effect on peach yield and quality in the short term.

Keywords: yellow peach; biochar; soil fertility; yield; quality

联合国粮农组织统计数据显示,2020年我国桃种植面积和产量均居世界第一位^[1]。鲜食黄桃是我国桃产业的重要发展方向之一,其果实营养丰富、口味浓郁、耐贮运,市场需求逐年上升。然而,随着我国农业集约化的发展,目前果园普遍存在化肥使用比例偏高、有机肥投入不足的问题,不仅导致肥料利用率下降,还造成土壤酸化、板结,果实产量和品质也下降^[2]。生物质炭是生物质废弃物在无氧或缺氧环境下低温热裂解制备的稳定富碳物质^[3]。生物质炭结构疏松多孔,具有碱性特征,且含丰富的有机碳和养分元素。其施用到土壤中可以通过改善土壤结构来缓解土壤酸化,提高土壤养分及养分有效性,促进有益微生物定殖,为作物根系提供良好的生长环境,进而促进作物生长,提高作物产量和品质^[4-5]。如葛顺峰等^[6]发现,将生物质炭施用到果园土壤中可通过降低土壤容重和增加土壤保肥能力,提高苹果树对氮肥的利用率,从而促进地上部生物量的增加。在湖北宜昌,Wu等^[7]发现生物质炭施用显著缓解了土壤酸化,土壤pH中和后,土壤养分有效性、土壤微生物活性和土壤酶活性均显著提高,土壤质量大幅提升,最终改善了柑橘果实品质。Wei等^[8]则发现,施用接种假单胞菌的生物质炭显著增加了土壤有效养分含量,提高了土壤脲酶和蔗糖酶活性,土壤肥力的提升又促进了芽单胞菌、放线菌等根际促生菌的定殖,为根系提供了更好的生长环境,进而提高了葡萄单果质量、纵横径、硬度和可溶性蛋白含量。在浙江台州,Zhang等^[9]也发现,施用小麦秸秆炭后,柑橘园土壤酸碱度改善,有机质和养分含量增加,土壤细菌丰度、均匀度和多样性提高,促进了腐生真菌定殖,进而提升了柑橘的可食性、可溶性固形物含量和固酸比。刘涛等^[10]发现,施用适量生物质炭(2、4 kg·m⁻²)可以增加桃树叶片养分,提高水蜜桃的坐果数和单株产量,但对品质

无显著提升作用。张晓颖^[11]通过为期1 a的盆栽试验发现,生物质炭施用可以显著增加连作土中有机质、速效钾含量,显著提高土壤pH值和胞外酶活性,促进毛桃幼苗对养分的吸收,缓解连作障碍。而Sorren-ti等^[12]的盆栽试验则发现生物质炭施用(16.4 g·kg⁻¹)降低了油桃根系的存活率,对土壤性质和地上部生长无显著影响。

生物质炭的性质主要受制备原料和热裂解温度的影响,相同热裂解条件下,以不同原料生产的生物质炭在理化性质上有较大差异^[13-14]。目前,不同原料生物质炭施用对桃园土壤肥力和桃产量及品质的研究尚鲜有报道。因此,本研究以黄桃为研究对象,选取3种常见农林废弃物制备的生物质炭,通过田间试验研究其对桃产量及品质、不同时期植株养分含量、成熟期土壤理化性质和土壤胞外酶活性的影响,探究不同原料生物质炭对桃园土壤肥力提升与桃产量和品质改善的潜力,为优化生物质炭在我国长江中下游地区桃园合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省苏州市相城区迎湖村后薛巷(31°42'N,120°43'E)。该地区属亚热带季风气候,年均降雨量1 100 mm,年平均气温16℃,年平均相对湿度76%,年无霜期300 d。供试树种为“锦绣”黄桃,树龄3 a,株行距为3.8 m×3.8 m,面积约700 m²。土壤类型为水稻土,后改种桃树,土壤质地为粉砂质黏壤土(表1)。

1.2 试验设计

试验共设置4个处理,包括常规施肥对照(CK)及施用水稻秸秆生物质炭(RB)、小麦秸秆生物质炭(WB)和杉木生物质炭(FB)处理。常规施肥处理:每

表1 供试土壤基础理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the experimental soils

容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	<0.002 mm 黏粒 Clay content/%	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)
1.32	17.50	5.11	15.85	97.58	13.53	258.25	0.90	0.72	17.80

株基施 2.5 kg 商品有机肥、0.2 kg 尿素,追施 0.4 kg 复合肥。生物质炭处理:在常规施肥基础上每株基施 11.7 kg(以干基计)生物质炭,生物质炭施用量折合 20 t·hm⁻²。基肥于 2020 年 11 月 30 日施用,沿树冠滴水线处挖施肥沟,均匀施入肥料和生物质炭后,用土覆盖。2021 年 6 月 12 日追施复合肥。选取桃树长势一致的 6 个连排小区,每个小区随机排列 4 株不同施肥处理的桃树,1 株树为一个重复,共 6 个重复。桃树生长期各施肥处理农艺措施相同。商品有机肥由江苏立华生物肥料有限公司生产,pH 为 6.51,总养分含量(N+P₂O₅+K₂O)≥5%,有机质含量≥45%;尿素 N≥46%;复合肥 N、P₂O₅、K₂O 比例为 17:17:17。本试验所用生物质炭购自南京勤丰秸秆科技有限公司,由水稻秸秆、小麦秸秆和杉木枝条在厌氧条件下热裂解(550 ℃)制得,其基础理化性质见表 2。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 生物质炭理化性质

按照柯贤林等^[13]的方法测定生物质炭基本性质及养分含量。采用比表面积和孔径分析仪(麦克 ASAP2460)测定生物质炭比表面积;按照炭水比 1:20 (m/V)制备悬液,浸提后使用 pH 计(FE28, Five Easy Plus)测定生物质炭 pH 值(水浸提);采用重铬酸钾容量法测定有机碳含量;浓硫酸消解制备待测液,采用流动分析仪(Seal AA3)测定生物质炭中氮含量,ICP-OES(Agilent 710)测定磷和钾含量。

1.3.2 土壤理化性质及酶活性

土壤样品采集于 2021 年 8 月 1 日(成熟期),清除地面枯枝落叶后,在施肥沟内侧区域用土钻采集 0~20 cm 深度的土壤。土样一部分于室内自然风干,研

磨分别过 20 目和 100 目筛,用于土壤理化性质测定;另一部分鲜土过筛混匀,保存于 4 ℃冰箱用于土壤胞外酶活性、铵态氮和硝态氮的测定。

采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定土壤阳离子交换量;根据鲍士旦^[15]的方法测定其余土壤理化指标:用 pH 计测定(称取 10 g 土,水土质量比 2.5:1)pH 值;用环刀法测定土壤容重;采用外加加热重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量;采用 2 mol·L⁻¹氯化钾溶液浸提土壤,流动分析仪(型号 Seal AA3)测定土壤铵态氮及硝态氮含量;采用半微量凯氏法测定全氮含量(浓硫酸消煮,流动分析仪测定);采用 0.5 mol·L⁻¹碳酸氢钠溶液浸提,钼锑抗比色法测定有效磷含量;采用 2 mol·L⁻¹硝酸浸提,火焰光度计测定速效钾含量。

土壤酶活性测定^[16]:称取 2.4 g 新鲜土样,放入离心管中,加入 7 mL 缓冲液和 8~10 粒小玻璃珠过夜。第 2 天将离心管中土壤样品漩涡分散均匀(30 s)后,全部转移至烧杯中,再加入缓冲液使烧杯中缓冲液体积为 300 mL,在磁力搅拌器上搅拌 1 min 以上使其充分混匀。用多通道移液器将土壤样品悬浊液(200 μL)、标准物(200 μL)和相应底物(200 μL)依次加入到黑底 96 微孔板中,培养 3 h 后,使用多功能酶标仪(Scientific Fluoroskan Ascent FL, Thermo)在激发波长为 365 nm、发射波长为 450 nm 的条件下检测荧光,测定 α-葡萄糖苷酶、β-葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶、木糖苷酶、β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶的活性。

1.3.3 植株养分含量测定

于 2021 年 5 月 13 日(膨大一期, P1)、6 月 17 日

表2 供试生物质炭基本理化性质

Table 2 Physicochemical properties of the biochar

生物质炭 Biochar	比表面积 Specific area/(m ² ·g ⁻¹)	pH	有机碳 Organic carbon/(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)
水稻秸秆(RB)	1.22	9.75	407.98	7.91	10.35	32.51
小麦秸秆(WB)	19.08	10.18	536.13	10.24	11.63	41.48
杉木(FB)	0.94	8.23	688.92	4.18	5.16	5.48

(硬核期,P2)、7月16日(膨大二期,P3)和8月1日(成熟期,P4)4个生育时期分别采集叶片和果实样品。每株树按东、西、南、北4个方向采集新梢中部叶片8片、果实4个用于养分含量测定。植株样品用去离子水洗净,105℃杀青30 min,在70℃下烘干至恒质量。干样粉碎后用浓硫酸-过氧化氢消煮,流动分析仪测定全氮含量;用浓硝酸-高氯酸消煮,ICP-OES法测定全磷、全钾含量。

1.3.4 产量和品质

于2021年8月2日(果实成熟期)测定桃产量。将每株无机械损伤、无病虫害的果实全部摘下并称总质量,计桃产量。在每株树东、南、西、北4个方位采集4个黄桃,每个处理共24个黄桃,测定黄桃品质。单果质量用百分之一天平称取,纵、横径用游标卡尺测定;可溶性固形物采用电子折光仪(PAL-1型)测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;可滴定酸含量采用氢氧化钠滴定法测定^[17];果形指数计算公式如下:

果形指数=纵径/横径 (1)

1.4 数据处理与分析

参照叶少萍等^[18]的方法,基于主成分分析对土壤肥力进行综合评价。由于需要选取多种指标数据进行综合分析,而土壤肥力指标在单位和数量级上存在差异,因此通过下列公式将评价土壤肥力所选指标的测定值归一化为0~1间的无量纲值,用于后续进行多指标的主成分分析及综合评价:

戒上型函数: $f(x)=0.1+0.9(X-L)/(U-L)$ (2)

戒下型函数: $f(x)=0.1+0.9(U-X)/(U-L)$ (3)

式中: U 为函数的上限值,本研究选取每一个测定指标中的最大值; L 为函数的下限值,选取每一测定指标中的最小值; X 为测定值。

综合考虑所有土壤指标,酸性磷酸酶用戒下型函数进行标准化,其余指标采用戒上型函数进行标

准化。对标准化后的数据集进行主成分分析,以各项独立公因子方差除以全部公因子方差得到各项指标权重,最后用下列公式进行各项指标的权重数值及其对应标准归一化数据的计算,获得土壤肥力的综合评价指数:

土壤肥力指数= $\sum_{i=1}^n W_i \times S_i$ (4)

式中: W_i 为各项指标权重; S_i 为各项指标的归一化数值; n 为所选数据集中指标的个数。

采用Excel 2013和Origin 2018进行数据整理和绘图,采用SPSS 25.0进行主成分分析和方差分析。数据经方差齐性检验后,处理间差异显著性分析采用单因素方差分析(LSD检验, $P<0.05$)。采用Pearson相关系数表征地上部生长状况与土壤肥力间的相关性。

2 结果与分析

2.1 黄桃产量及品质

由表3可知,WB处理较常规施肥单果质量显著降低了12.7%,可滴定酸含量显著降低了13.8%;在对产量和其他品质的影响上,生物质炭处理和常规施肥没有显著差异。

2.2 叶片和果实养分含量

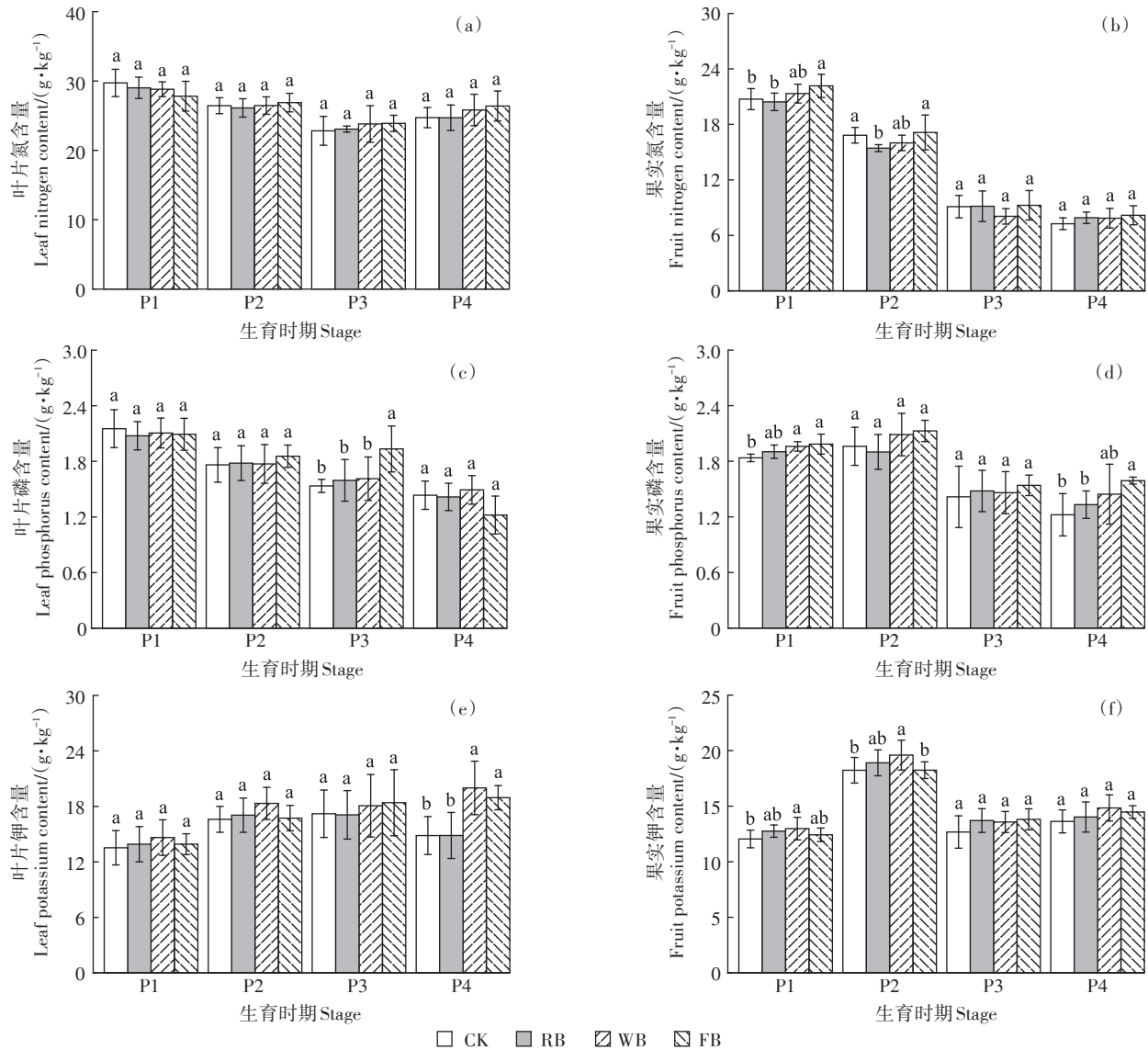
图1为不同生长时期叶片和果实养分含量。不同生物质炭处理对各个时期叶片氮含量无显著影响,而在P1时期,FB处理果实氮含量较CK显著提高7.0%,RB处理果实氮含量在P2时期较CK显著降低8.3%,其他时期各处理果实氮含量无显著差异。FB处理叶片磷含量在P3时期较CK显著提高26.1%,在其他时期各处理无显著差异;WB和FB处理果实磷含量在P1时期较CK分别显著提高6.5%和7.8%,FB处理在P4时期较CK显著提高30.3%,各处理果实磷含量在P2和P3时期无显著变化。施用生物质炭在P1~P3时期对叶片钾含量无显著影响,但WB和FB处

表3 不同生物质炭处理对桃产量和品质的影响

Table 3 Effects of different biochar on peach yield and quality

处理 Treatment	产量 Yield/kg	单果质量 Single fruit mass/g	果形指数 Fruit shape index	可溶性固形物含量 Soluble solid content/%	可滴定酸含量 Titratable acid content/%	可溶性糖含量 Soluble sugar content/%	糖酸比 Sugar/acid
CK	51.72±8.24a	296.97±28.28a	0.97±0.02a	11.67±0.68a	0.29±0.02a	7.65±0.73a	26.26±4.01ab
RB	57.15±19.45a	269.57±22.12ab	0.94±0.03a	11.57±0.61a	0.29±0.02a	7.52±0.95a	26.49±3.95ab
WB	51.42±6.07a	259.36±27.25b	0.96±0.04a	11.57±0.45a	0.25±0.02b	7.31±0.50a	29.13±3.95a
FB	45.31±10.79a	289.91±35.63ab	0.98±0.03a	11.18±0.54a	0.30±0.01a	6.88±0.62a	22.94±2.56b

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different letters in a column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.



P1:膨大一期,P2:硬核期,P3:膨大二期,P4:成熟期。不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

P1: the first expanding stage, P2: the hard-core stage, P3: the second expanding stage, P4: the mature stage. Different letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图1 不同生物质炭处理对叶片及果实中氮、磷、钾含量的影响

Figure 1 Effects of different biochar on N, P, K contents in leaves and fruits

理叶片钾含量在P4时期较CK分别显著提高34.7%和27.5%;与叶片钾含量变化不同,WB处理果实钾含量在P1时期和P2时期较CK分别显著提高7.7%和7.5%,P3和P4时期各处理间果实钾含量无显著差异。总体上,WB和FB处理促进了地上部对养分的吸收,WB处理显著提升了部分生育时期叶片钾含量和果实磷、钾含量,FB处理则显著提升了部分生育时期叶片磷、钾含量和果实氮、磷含量。

2.3 桃园土壤理化性质

不同生物质炭处理对土壤性质的影响程度各异。由表4可知,WB较CK处理土壤pH显著提高

了6.7%,而其余处理则无显著差异。WB处理较CK处理显著提高了土壤阳离子交换量,增幅为15.4%。RB、WB、FB处理较CK处理均显著提高了土壤有机质含量,增幅分别为29.5%、19.9%和21.6%。WB处理土壤全氮含量较CK处理显著提高了17.6%。生物质炭处理土壤铵态氮、硝态氮和有效磷含量均显著低于CK处理。各处理土壤速效钾含量无显著差异。

2.4 桃园土壤胞外酶活性

表5为不同处理下的土壤酶活性,生物质炭处理下土壤归一化酶活性均显著高于CK处理,增幅为

80.0%~96.0%。WB和FB处理土壤 α -葡糖苷酶活性较CK处理分别显著提高了224.7%和375.8%。与CK相比,RB、WB和FB处理土壤 β -葡糖苷酶活性分别提高了50.5%、42.1%和50.2%,纤维二糖水解酶活性分别提高了165.4%、187.2%和171.3%。RB和WB处理较CK处理显著提高了土壤木糖苷酶和 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性,RB处理分别提高了119.8%和77.6%,WB处理分别提高了183.5%和

44.8%。土壤酸性磷酸酶活性在RB和FB处理下较CK处理分别显著提高了34.5%和30.8%。

2.5 地上部生长和果实品质与土壤肥力关系

相关性分析(表6)显示,不同处理下桃产量、单果质量、可溶性固形物、糖酸比、叶片氮含量变化与土壤各肥力指标及酶活性均无显著相关性。果实可溶性糖含量与 α -葡糖苷酶活性呈极显著负相关,可滴定酸含量与土壤全氮含量呈显著负相关。叶片磷和

表4 不同生物炭处理对土壤理化性质的影响

Table 4 Effects of different biochar treatments on soil physicochemical properties

处理 Treatment	pH	阳离子交换量 CEC/ ($\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮 Total N/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铵态氮 $\text{NH}_4^+\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available P/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	5.83±0.24b	15.60±0.79b	19.95±2.44b	0.91±0.07b	9.95±0.69a	6.44±0.49a	25.69±6.44a	245.42±35.13a
RB	5.97±0.16b	16.46±1.34ab	25.83±2.23a	0.92±0.12b	6.93±0.42bc	4.84±0.32b	15.82±2.42b	236.12±51.38a
WB	6.22±0.09a	18.00±2.14a	23.93±2.39a	1.07±0.09a	7.19±0.33b	4.95±0.18b	17.91±7.55b	250.27±60.12a
FB	5.97±0.27b	15.44±1.90b	24.25±2.77a	0.94±0.07b	6.57±0.23c	5.11±0.41b	15.71±3.42b	238.34±59.82a

表5 不同生物炭处理对土壤酶活性的影响($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)

Table 5 Effects of different biochar on soil enzyme activities($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)

处理 Treatment	α -葡糖苷酶 α -glucosidase	β -葡糖苷酶 β -glucosidase	纤维二糖水解酶 β -D-cellubiosidase	木糖苷酶 β -xylosidase	β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 β -N-acetyl glucosaminidase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	归一化酶 Normalized enzyme
CK	4.01±1.10c	120.60±28.52b	14.95±5.09b	11.87±1.61c	40.69±7.55c	112.66±19.12b	0.025±0.002b
RB	8.49±3.67bc	181.56±43.02a	39.68±10.01a	26.09±11.11ab	72.27±8.73a	151.48±25.70a	0.045±0.004a
WB	13.02±3.27b	171.32±28.63a	42.93±8.43a	33.65±14.04a	58.90±17.76ab	140.71±9.06ab	0.049±0.003a
FB	19.08±6.42a	181.20±38.93a	40.56±8.67a	20.09±9.13bc	49.53±11.09bc	147.34±34.90a	0.047±0.006a

表6 土壤养分、酶活性与叶、果养分及果实品质之间相关性

Table 6 Correlations between soil nutrients, enzyme activities, leaf and fruit nutrients and fruit qualities

项目 Item	叶片氮 Leaf N	叶片磷 Leaf P	叶片钾 Leaf K	果实氮 Fruit N	果实磷 Fruit P	果实钾 Fruit K	产量 Yield	单果质量 Single fruit mass	可溶性固形物 Soluble solid content	可溶性糖 Soluble sugar content	可滴定酸 Titratable acid content	糖酸比 Sugar/ acid
全氮	0.031	0.134	0.351	0.011	0.315	0.277	0.222	-0.129	-0.113	-0.030	-0.445*	0.394
铵态氮	-0.073	0.237	-0.429*	-0.304	-0.427*	-0.186	-0.033	0.314	0.127	0.271	-0.014	0.062
硝态氮	-0.033	0.132	-0.292	-0.332	-0.452*	-0.214	-0.028	0.314	-0.010	0.223	0.078	0.015
有效磷	-0.127	0.331	-0.263	-0.432*	-0.525**	-0.256	0.145	0.373	0.380	0.292	0.090	0.071
速效钾	-0.057	0.568**	0.004	-0.016	-0.042	-0.088	0.250	0.128	0.285	0.340	-0.133	0.313
有机质	0.133	0.009	0.176	0.307	0.245	0.226	-0.023	-0.141	-0.168	0.126	-0.129	0.184
α -葡糖苷酶	0.151	-0.345	0.679**	0.471*	0.591**	0.345	-0.363	-0.107	-0.078	-0.520**	0.235	-0.401
β -葡糖苷酶	0.070	-0.100	0.173	0.334	0.355	0.358	-0.133	0.140	0.123	-0.313	0.088	-0.192
纤维二糖水解酶	0.049	-0.143	0.332	0.300	0.437*	0.245	-0.173	-0.193	-0.038	-0.280	-0.114	0.015
木糖苷酶	-0.062	-0.008	0.452*	0.281	0.350	0.439*	0.004	-0.349	0.040	-0.248	-0.396	0.168
β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶	-0.331	0.119	-0.114	0.106	-0.039	0.088	0.161	-0.131	-0.020	0.069	-0.144	0.178
酸性磷酸酶	0.121	-0.026	0.035	0.050	0.336	0.296	0.058	0.063	-0.245	-0.241	0.183	-0.147

注:*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关;**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。
Note:*indicates significant correlation at $P<0.05$ level, and **indicates significant correlation at $P<0.01$ level.

土壤速效钾含量呈显著正相关;叶片钾含量与 α -葡萄糖苷酶和木糖苷酶活性呈显著正相关,而与土壤铵态氮含量呈显著负相关;果实氮含量和土壤有效磷含量呈显著负相关,而与 α -葡萄糖苷酶活性呈显著正相关;果实磷和土壤铵态氮、硝态氮和有效磷含量呈显著负相关,而与 α -葡萄糖苷酶和纤维二糖水解酶活性呈显著正相关;果实钾含量与木糖苷酶活性呈显著正相关。土壤有效氮、磷的减少与叶、果氮含量及果实磷含量的增加密切相关。

2.6 土壤肥力综合评价

各处理土壤肥力指数从高到底依次为小麦秸秆炭处理(0.53)>水稻秸秆炭处理(0.50)>杉木炭处理(0.49)>常规施肥处理(0.45),不同生物质炭处理对土壤肥力的影响程度不同,RB和FB处理对土壤肥力无显著影响,而WB处理较CK处理显著提高了土壤肥力(图2)。

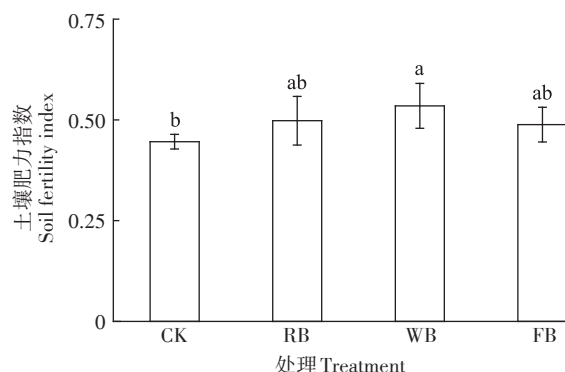


图2 不同生物质炭处理土壤综合肥力指标变化

Figure 2 Changes of the comprehensive evaluation of soil fertility under different biochar treatments

3 讨论

本研究发现施用生物质炭改善了土壤肥力,尤其提高了土壤酶活性,与前人研究结果^[7-8]类似。土壤肥力提升不同程度影响黄桃果实养分吸收和品质,但短期内对桃产量无显著影响。

3.1 生物质炭施用对土壤肥力的影响

生物炭是一种孔隙结构丰富的富碳物质,因其特殊的理化性质,施入土壤后可以改变养分有效性,影响土壤肥力。张良英等^[19]研究发现鸡粪配施草炭显著提高了桃园土壤有机质、有效磷和速效钾等养分含量。而本研究结果显示,配施生物质炭处理土壤有机质含量较对照显著提高,而土壤铵态氮、硝态氮和有效磷含量较对照显著降低。土壤有机质是指示土壤

肥力的重要指标,以往研究认为生物质炭施用提升土壤有机质含量的主要原因在于其本身含有大量的惰性碳成分,这些惰性碳成分可以有效地对农田生态系统起到固碳效果,而且可以维持几十年甚至几百年^[20]。而土壤有效氮的降低则与Nguyen等^[21]通过荟萃分析(多数研究为短期试验)得出的结果一致,生物质炭的高C/N特性及带入的活性物质会引起微生物对土壤矿质氮的固定,降低氮素有效性。在对土壤磷有效性的影响上,相关研究发现,酸性土壤中生物质炭施用对土壤磷有效性的影响与土壤磷肥水平密切相关^[22]。在磷肥充足时,生物质炭土壤对磷素的吸附作用显著,会降低有效磷含量,而当土壤磷肥较少时,生物质炭吸附的磷则会解吸出来,提高土壤有效磷含量。桃树对磷肥的需求较低,桃园土壤有效磷含量处于较高水平,生物质炭的吸附作用可能是有效磷降低的主导因素。此外,本研究结果显示成熟期生物质炭处理叶片、果实中氮含量和果实中的磷含量相比CK处理均有所增加(图1),这可能是因为生物质炭的施用可以改善土壤结构,促进根系穿插生长,从而提高了树体的养分吸收能力^[19,23]。而地上部养分的提高也会导致土壤残留养分的降低。相关性分析(表6)结果也显示,叶片、果实中氮含量与土壤有效氮含量呈负相关,果实磷含量与土壤有效磷含量呈极显著负相关。

3.2 生物质炭施用对土壤酶活性的影响

土壤胞外酶活性与土壤肥力密切相关,本研究中 α -葡萄糖苷酶、 β -葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶和木聚糖苷酶与土壤碳循环相关, β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶与土壤氮循环相关,酸性磷酸酶与土壤磷循环相关。一般认为,生物质炭施用主要通过生物因素影响土壤酶活性。张莉等^[24]的研究显示,尿素混合生物质炭穴施显著提高了土壤中与碳、氮、磷相关的酶活性,并且认为生物质炭含有的可利用碳源和氮源是促进微生物繁殖、提高胞外酶活性的重要因素。除提供能源物质外,生物质炭丰富的孔隙结构为微生物提供的良好微生境也可以促进微生物的繁殖,进而提高土壤酶活性^[25]。还有研究认为新鲜生物质炭中含有的促微生物活性物质是生物质炭施用影响土壤酶活的主要因素^[26]。本研究结果表明,各生物质炭施用处理均提高了土壤胞外酶活性,说明本研究选取的几种生物质炭均可促进土壤碳、氮、磷循环,对土壤肥力的提升有积极作用。基于主成分分析的土壤综合肥力评价结果(图2)也显示生物质炭施用均提升了土壤综合肥力

指数,且以WB处理的提升最为显著,与归一化酶结果一致。这说明生物质炭施用均提升了土壤肥力,其中常规施肥配施 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 小麦秸秆生物质炭为提高桃园土壤肥力的最佳处理。

3.3 生物质炭施用对桃产量和品质的影响

本研究中生物质炭施用并未显著提高桃产量,且FB处理下桃产量有所下降,其原因可能是生物质炭施用导致土壤C/N提高,微生物同化氮素量提升,与作物竞争氮素的吸收,不利于产量的增加^[21]。FB处理较CK产量有所下降可能与杉木炭较高的C/N有关。本研究中,生物质炭处理土壤铵态氮、硝态氮含量低于对照,且成熟期叶片、果实氮含量相较对照无显著提高也验证了这一点。此外,在田间试验中,生物质炭施用后在接下来的数年内对作物的影响不同。Major等^[27]在玉米地4 a单施生物质炭的研究结果显示,第1年玉米产量无显著提高,但是在第2、3年和第4年的产量分别比对照提高了28%、30%和140%。本试验开展时间较短,生物质炭施用对黄桃产量的影响还有待进一步观察。桃品质主要与果实中氮、钾含量相关,土壤中充足的有效氮有利于果实中总糖含量的增加,钾素在植物体内能激活各种酶活性,在促进果实成熟、提高果实品质方面起着极其重要的作用^[28-29]。许多关于钾营养对油桃品质影响的研究结果显示,在一定范围内,随着钾肥施用量的提升,油桃的可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸和糖酸比等内在品质均有所改善^[30-31]。而在本研究中,生物质炭施用对果实品质的影响较小,可能是因为生物质炭施用后成熟期果实氮、钾含量的提升较小(图1),均未达显著水平($P>0.05$)。WB处理显著降低可滴定酸含量则是因为在该处理下果实钾含量的升幅最高,且在膨大一期和膨大二期显著高于CK处理。而WB处理下黄桃单果质量下降可能是由于小麦秸秆炭施用降低了土壤部分微量元素的有效性。相关研究认为生物质炭施入可使土壤pH提高,会引起微量元素缺乏症,从而影响作物正常生长^[32],而WB处理下土壤pH的提高最为显著。

4 结论

(1)各生物质炭处理均显著增加了桃园土壤有机质含量,降低了土壤有效氮和有效磷含量,均显著提高了土壤归一化酶活性。小麦秸秆炭处理显著提升了土壤肥力。

(2)生物质炭处理可促进桃树地上部养分的吸

收,小麦秸秆炭和杉木炭处理显著提高了黄桃部分生育时期叶片和果实养分含量。

(3)生物质炭施用短期内对黄桃产量和品质的影响较小。

参考文献:

- [1] FAO. FAOSTAT database[DB/OL]. [2022-06-13]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/QCL>.
- [2] 王力荣. 我国桃产业现状与发展建议[J]. 中国果树, 2021(10): 1-5. WANG L R. Current situation and development suggestions of peach industry in China[J]. *China Fruits*, 2021(10): 1-5.
- [3] 潘根兴, 李恋卿, 刘晓雨, 等. 热裂解生物质炭产业化: 秸秆禁烧与绿色农业新途径[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 92-101. PAN G X, LI L Q, LIU X Y, et al. Industrialization of biochar from biomass pyrolysis: A new option for straw burning ban and green agriculture of China[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(13): 92-101.
- [4] YU H, ZOU W, CHEN J, et al. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 232: 8-21.
- [5] 刘成, 刘晓雨, 张旭辉, 等. 基于整合分析方法评价我国生物质炭施用的增产与固碳减排效果[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 696-706. LIU C, LIU X Y, ZHANG X H, et al. Evaluating the effects of biochar amendment on crop yield and soil carbon sequestration and greenhouse gas emission using meta-analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 696-706.
- [6] 葛顺峰, 彭玲, 任饴华, 等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 366-373. GE S F, PENG L, REN Y H, et al. Effect of straw and biochar on soil bulk density, cation exchange capacity and nitrogen absorption in apple orchard soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(2): 366-373.
- [7] WU S, ZHANG Y, TAN Q, et al. Biochar is superior to lime in improving acidic soil properties and fruit quality of Satsuma mandarin[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136722.
- [8] WEI M M, LIU X C, HE Y H, et al. Biochar inoculated with *Pseudomonas putida* improves grape (*Vitis vinifera* L.) fruit quality and alters bacterial diversity[J]. *Rhizosphere*, 2020, 16: 100261.
- [9] ZHANG M Y, ZHANG L, MUHAMMAD R, et al. Biochar amendment improved fruit quality and soil properties and microbial communities at different depths in citrus production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: 126062.
- [10] 刘涛, 张涛, 谢乐添, 等. 生物炭和微生物肥对水蜜桃产量和品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(2): 284-289. LIU T, ZHANG T, XIE L T, et al. Effects of biochar and microbial fertilizer on yield and quality of honey peach[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(2): 284-289.
- [11] 张晓颖. 生物质炭对桃连作障碍的缓解作用[J]. 农业科技通讯, 2018(1): 155-157. ZHANG X Y. Alleviating effect of biochar on continuous cropping obstacle of peach[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2018(1): 155-157.

- [12] SORRENTI G, MUZZI E, TOSELI M. Root growth dynamic and plant performance of nectarine trees amended with biochar and compost[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 257: 108710.
- [13] 柯贤林, 恽壮志, 刘铭龙, 等. 不同来源生物质废弃物热解炭化农业应用潜力分析: 生物质炭产率、性质及促生效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(7): 1113-1128. KE X L, YUN Z Z, LIU M L, et al. Potential of pyrolysis for agricultural application of different bio-wastes: Biochar yield, properties and their crop growth effects[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(7): 1113-1128.
- [14] LIU X, ZHANG A, JI C, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions: A meta-analysis of literature data[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373: 583-594.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-114. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-114.
- [16] STEINWEG M, MCMAHON S. Microplate enzyme assay using fluorescence[EB/OL]. (2012-01-09)[2022-06-13]. http://www.eeescience.utoledo.edu/faculty/weintraub/NREL_enzyme_assay_protocol.pdf.htm.
- [17] 曹健康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 21-54. CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 21-54.
- [18] 叶少萍, 李铤, 张俊涛, 等. 基于主成分分析的古树土壤肥力综合评价[J]. 生态科学, 2022, 41(1): 196-205. YE S P, LI T, ZHANG J T, et al. Comprehensive evaluation of soil fertility for ancient trees based on principal component analysis[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(1): 196-205.
- [19] 张良英, 王永熙, 王小伟, 等. 草炭对桃园土壤理化性状及桃树生物效应的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008(3): 145-149. ZHANG L Y, WANG Y X, WANG X W, et al. Effect of chicken manure and peat combination on soil property and root distribution and fruit quality of peach tree[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2008(3): 145-149.
- [20] KUZYAKOV Y, BOGOMONOVA I, GLASTER B. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ^{14}C analysis[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 70(6): 229-236.
- [21] NGUYEN T T N, XU C Y, TAHMASBIAN I, et al. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2017, 288: 79-96.
- [22] XU G, SUN J N, SHAO H B, et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62(1): 54-60.
- [23] 吴文利, 康亚龙, 曾少敏, 等. 生物有机肥配施硅钾钙改良剂对酸性红壤梨园土壤肥力及产量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(2): 305-314. WU W L, KANG Y L, ZENG S M, et al. Effects of bio-organic fertilizer and silicon-potassium-calcium amendment on soil fertility and yield of pear orchard in acid red soil[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2021, 44(2): 305-314.
- [24] 张莉, 任建新, 韩国君, 等. 尿素混合生物质炭穴施对土壤氮含量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 1974-1982. ZHANG L, REN J X, HAN G J, et al. Effects of hole application of urea mixed with biochar on nitrogen content and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 1974-1982.
- [25] 张志龙, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物质炭对黄瓜连作土壤中微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1384-1391. ZHANG Z L, CHEN X M, QU C C, et al. Effects of biochar addition on soil microbial biomass C, N and enzyme activities in cucumber continuous cropping[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5): 1384-1391.
- [26] ZIMMERMAN A R, GAO B, AHN M Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar amended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(6): 1169-1179.
- [27] MAJOR J, RONDON M, MOLINA D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 117-128.
- [28] 叶正文, 李雄伟, 马亚萍, 等. 桃果实糖代谢研究进展桃果实糖代谢研究进展[J]. 上海农业学报, 2019, 35(4): 144-150. YE Z W, LI X W, MA Y P, et al. Research progress of sugar metabolism in peach[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2019, 35(4): 144-150.
- [29] 郭磊, 张斌斌, 宋宏峰, 等. 增施钾肥对大棚蟠桃品质及营养生长的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(11): 2273-2279. GUO L, ZHANG B B, SONG H F, et al. Effect of potassium fertilizer application on fruit quality and vegetative growth of flat peach[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(11): 2273-2279.
- [30] 陈栋, 涂美艳, 杜晋城, 等. 不同施钾量对曙光油桃产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(4): 1173-1176. CHEN D, TU M Y, DU J C, et al. Effect of potassium nutrition on yield and quality of nectarine[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23(4): 1173-1176.
- [31] 杨颖, 火建福. 不同施钾量对油桃果实品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(26): 84-85, 107. YANG Y, HUO J F. Effects of potassium amount on quality of nectarine[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2015, 43(26): 84-85, 107.
- [32] CHAN K Y, VAN ZWIETEN L, MEAZAROS I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45: 629-634.