

水稻秸秆生物炭对镉污染农田中番茄产量和品质的影响机制

吴伟健, 陈艺杰, 李高洋, 张伟健, 林海虹, 蔺中, 甄珍

引用本文:

吴伟健, 陈艺杰, 李高洋, 张伟健, 林海虹, 蔺中, 甄珍. 水稻秸秆生物炭对镉污染农田中番茄产量和品质的影响机制[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 492–503.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0846>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 孙鹤洲, 刘傲展

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2001–2007 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0258>

氧化老化过程对生物炭吸附镉的影响及机制

何玉垒, 宋宁宁, 林大松, 孙约兵, 王芳丽

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1877–1887 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0310>

CO₂-N₂气氛下热解工艺对稻秆生物炭吸附Cd²⁺的影响

周红卫, 陈振焱, 胡超, 张亚平, 顾东清

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1605–1612 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1406>

生物炭与水分管理耦合对晚稻镉迁移与积累的影响

王义, 王勃然, 周文涛, 祝志娟, 刘莉, 祝博文, 傅志强

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1479–1485 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1408>

高铁酸钾/高锰酸钾改性生物炭对Cd²⁺的吸附研究

蒋子旻, 徐敏, 伍钧

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 876–883 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1123>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴伟健, 陈艺杰, 李高洋, 等. 水稻秸秆生物炭对镉污染农田中番茄产量和品质的影响机制[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 492–503.

WU W J, CHEN Y J, LI G Y, et al. Effects of rice straw biochar on tomato yield and quality in farmland affected by Cd contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(3): 492–503.

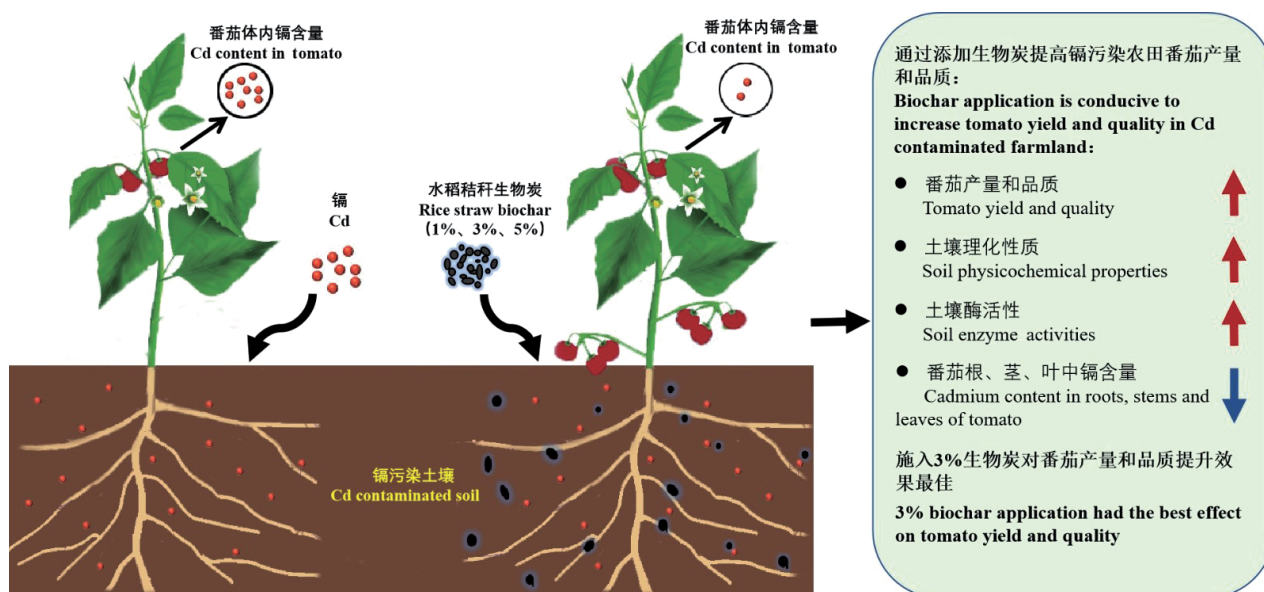


开放科学 OSID

水稻秸秆生物炭对镉污染农田中番茄产量和品质的影响机制

吴伟健¹, 陈艺杰¹, 李高洋¹, 张伟健¹, 林海虹¹, 蔺中², 甄珍^{1*}

(1. 广东海洋大学滨海农业学院, 广东 湛江 524088; 2. 广东海洋大学化学与环境学院, 广东 湛江 524088)



摘要:为探究不同比例生物炭对镉污染农田中番茄产量和品质及其体内镉累积的影响,以千禧番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)为材料,设计4个处理(CK:不添加生物炭;T₁:1%生物炭;T₂:3%生物炭;T₃:5%生物炭),采用盆栽试验研究了不同处理下番茄根系、茎部和果实中镉的累积、产量与品质和土壤理化性质与酶活性的差异。结果表明:与CK处理相比,添加生物炭显著提高了番茄的产量和品质(维生素C、番茄红素、可溶性蛋白、可溶性糖含量和糖酸比),其中T₂处理的品质提升效果最显著,分别较CK处理提高了24.7%、114.4%、12.0%、37.4%和80.0%。添加生物炭可显著降低番茄体内(根系、茎部和果实)镉含量,其中T₃处理的效果最显著,在生长末期,T₃处理番茄根系、茎部和果实中的镉含量分别为1.31、0.33 mg·kg⁻¹和0.03 mg·kg⁻¹。此外,在番茄的整个生育期中添加生物炭可显著改善土壤理化性质(pH和腐殖质),提高土壤养分含量(碱解氮、速效磷和速效钾)和酶活性(脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和纤维素酶),其中在生长末期,T₂处理的碱解氮、速效磷、速效钾含量和脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和纤维素酶活性显著高于其余处理,依次为47.42、165.85、167.76 mg·kg⁻¹和6.28 mg·g⁻¹·d⁻¹、3.20 mg·g⁻¹·20 min⁻¹、1.07 mg·g⁻¹·d⁻¹和2.13 mg·g⁻¹·d⁻¹。

收稿日期:2021-07-26 录用日期:2021-09-13

作者简介:吴伟健(1996—),男,广东肇庆市人,硕士研究生,主要从事土壤污染修复研究。E-mail:13414966250@163.com

*通信作者:甄珍 E-mail:zz19830302@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41977125, 41907033);广东省自然科学基金项目(2019A1515011948, 2018A030313131, 2018A030307054)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41977125, 41907033); Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (2019A1515011948, 2018A030313131, 2018A030307054)

d^{-1} ; T_3 处理对pH、腐殖质含量提高效果最为明显,分别为7.15和24.56 $g \cdot kg^{-1}$,但与 T_2 处理无显著差异。研究表明,添加生物炭可显著降低番茄体内镉含量,改善土壤理化性质并提高土壤养分含量,进而提高番茄的产量和品质,其中以3%生物炭处理效果最佳。同时,添加生物炭显著提高了土壤的酶活性,改善土壤的生态环境。

关键词:生物炭;镉;番茄;产量;土壤理化性质

中图分类号:S641.2;X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2022)03-0492-12 **doi:**10.11654/jaes.2021-0846

Effects of rice straw biochar on tomato yield and quality in farmland affected by Cd contamination

WU Weijian¹, CHEN Yijie¹, LI Gaoyang¹, ZHANG Weijian¹, LIN Haihong², LIN Zhong², ZHEN Zhen^{1*}

(1. College of Coastal Agricultural Sciences, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. College of Chemistry and Environmental Sciences, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: This study explored the effects of different proportions of biochar on the yield, quality, and Cd accumulation of a tomato species (*Lycopersicon esculentum* mill.) in Cd contaminated soil. The effects of biochar on these variables as well as the soil physicochemical properties and enzymes activities were studied using pot experiments under four treatments (CK: no biochar added; T_1 : 1% biochar; T_2 : 3% biochar; T_3 : 5% biochar). The results showed that the tomato yield and quality were significantly improved by adding biochar. For instance, the quality parameters of vitamin C, lycopene, soluble protein, soluble sugar content, and sugar/acid ratio increased significantly by 24.7%, 114.4%, 12.0%, 37.4%, and 80.0%, respectively, in the T_2 treatment compared with the CK treatment. Biochar addition effectively reduced the Cd contents of the tomato roots, stems, and fruit, with the most significant reductions observed in the T_3 treatment. During the late fruit period, the Cd contents of the tomato roots, stems, and fruit in the T_3 treatment were 1.31, 0.33 $mg \cdot kg^{-1}$, and 0.03 $mg \cdot kg^{-1}$, respectively. In addition, the biochar treatments alleviated Cd stress in soil and significantly enhanced the soil physicochemical properties (pH and humus), nutrient contents (alkali-hydrolysable nitrogen, available phosphorus, and available potassium), and enzymes activities (urease, catalase, sucrase, and cellulase) throughout the entire growth period. In the T_2 treatment during the late fruit period, the contents of alkali-hydrolysable nitrogen (47.42 $mg \cdot kg^{-1}$), available phosphorus (165.85 $mg \cdot kg^{-1}$), and available potassium (167.76 $mg \cdot kg^{-1}$) in soil, and the activities of urease (6.28 $mg \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$), catalase (3.20 $mg \cdot g^{-1} \cdot 20 min^{-1}$), sucrase (1.07 $mg \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$), and cellulase (2.13 $mg \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$) were all significantly higher than those of the other treatments. The T_3 treatment had the most significant effect on the pH and humus content of soil, but there was no significant difference with the T_2 treatment, which were 7.15 and 24.56 $g \cdot kg^{-1}$, respectively. Biochar addition significantly reduced the Cd content in tomato plants, enhanced the soil physicochemical properties, and further increased the tomato yield and quality, with the best effects achieved in the 3% biochar treatment. Moreover, biochar addition significantly increased the soil enzymes activities and improved the soil ecological environment.

Keywords: biochar; Cd; tomato; yield; soil physicochemical properties

番茄是一种营养价值和经济效益均较高的果蔬,在我国蔬菜生产和加工中占据重要地位^[1]。我国已成为世界上最大的番茄生产国,种植面积达101.17万 hm^2 ,平均产量超过82.5 $t \cdot hm^{-2}$ ^[2]。镉是一种在土壤中移动性强、中毒浓度低、污染面积广的有毒重金属^[3]。我国农田镉污染点位超标率高达7.0%,在农田重金属污染种类中排位第一^[4]。我国南方地区耕地重金属镉含量普遍高于其他地区,广东地区的重金属镉污染问题最为严重。南方部分土壤镉含量达到3.15 $mg \cdot kg^{-1}$ ^[5],已严重超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的农用地土壤污染风险筛选值。镉具有较强的生物迁移性及富集性,容易被番茄发达的根系吸收和转运,最终在番茄中积累,并通过食物链传递到人体从而危害人

体健康^[6-7]。人体内积累大量的镉易提高癌症的发病率,还会引发心血管系统疾病、器官损伤以及代谢类疾病^[8]。因此,寻找一种高效环保的方法来确保镉污染农田的安全生产刻不容缓。

生物炭是由农业和动物的废弃物等低价值材料在低氧或无氧条件下经过高温热解形成的一种固态多碳物质^[9]。生物炭由于其较大的比表面积、丰富的表面官能团和芳香结构等理化特性而具有很强的吸附能力,能有效吸附土壤中的重金属,降低土壤重金属的生物有效性和迁移性^[8,10]。重金属会与生物炭表面的羟基和羧基优先结合,并以络合物形式存在,从而减少作物对重金属的吸收和转运^[11-13]。刘冲等^[14]表明添加生物炭可有效降低油麦菜根系和茎叶中Cd、Cu、Pb和Zn含量,且重金属含量随生物炭增加而降

低。ALMAROAI等^[15]的研究指出生物炭的添加可降低土壤中重金属的生物可利用度,从而降低土壤中Pb向番茄植株体内的迁移和转运。此外,生物炭的矿质养分和微量元素含量较高,可提供作物生长所必需的元素(N、P、K、Ca、Mg等)^[16-17]。生物炭的多孔特性和大的比表面积有利于土壤聚集水分,促进土壤团聚体形成,改善土壤水分和养分的保留能力,从而促进作物生长、提高作物产量^[18-19]。生物炭可以改善土壤健康状况、提高水分利用效率和肥料利用率^[2,20-21]。土壤中施入生物炭可有效提高阳离子交换能力、养分循环能力、保持植物有效水分的能力并减少养分淋失^[22]。因此,生物炭不仅能直接降低土壤中重金属的迁移性和有效性,而且能增加土壤肥力、促进作物生长,对降低农田土壤重金属污染和维持作物安全生产具有重要意义。近年来,有关生物炭对土壤重金属的吸附固定、形态转化和促进作物生长方面已有大量的研究。但生物炭对作物品质及作物体内重金属积累特征的研究仍非常有限。

本文以番茄为研究对象,探究不同比例生物炭(1%、3%和5%生物炭)对镉污染土壤中番茄产量和品质及根系、茎部和果实中镉累积的影响。对添加不同比例生物炭的土壤理化性质、酶活性和番茄系列指标进行相关性分析,明确生物炭对镉污染土壤中番茄产量和品质的影响机制,以期为我国镉污染农田的安全利用提供可行性技术方案。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究以千禧番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)为材料。试验区位于广东省湛江市广东海洋大学后山园林实习基地的温室大棚(21°09'20"N, 110°18'10"E)。试验区地处粤、桂、琼三省份交汇处,属热带和亚热带季风气候。年平均温度为23℃,年平均降水量为1 417~1 802 mm,年平均日照时数为1 817~2 106 h。供试土壤采自广东海洋大学后山旱地0~20 cm耕作层的土壤(砖红壤)。土壤除去地表石子、植被等杂物后,混匀,自然风干,过0.84 mm筛备用。供试土壤镉含量为0.09 mg·kg⁻¹,土壤质地为砂壤土,pH为6.08,有机质含量为14.83 g·kg⁻¹,碱解氮含量为26.18 mg·kg⁻¹,速效磷含量为65.78 mg·kg⁻¹,速效钾含量为49.13 mg·kg⁻¹。供试生物炭购自江苏华丰农业生物工程有限公司,为450℃碳化的水稻秸秆生物炭:pH为8.75,有机碳含量为647.34 g·kg⁻¹,全氮含量为6.21

g·kg⁻¹,全磷含量为1.85 g·kg⁻¹,全钾含量为28.96 g·kg⁻¹,镉含量为0.04 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本试验共设4个处理:不添加生物炭(CK);施入1%生物炭(T₁);施入3%生物炭(T₂);施入5%生物炭(T₃)。每个处理设9个重复。试验前,栽培盆装入2.5 kg风干过筛后的土壤,量取10 mL浓度为1 mol·L⁻¹的CdCl₂·2.5 H₂O母液,加到290 mL去离子水中,浇入试验土壤并充分搅拌均匀,模拟土壤镉含量为5.0 mg·kg⁻¹,形成以镉为单一污染源的污染土壤。随后加入相应添加量的生物炭与污染土壤充分混匀,共预处理36盆。待预处理土壤老化30 d后用于番茄的种植,每盆种植1株。番茄栽培管理和施肥措施与正常生产一致。

1.3 样品采集和测定方法

1.3.1 样品采集方法

分别在番茄的初果期(50 d)、盛果期(65 d)和生长末期(80 d),每个处理随机取3盆,将植株整体挖出,并将土壤和植株分开。土壤经自然风干、研磨过筛后,存于-4℃冰箱用于后续土壤理化性质(pH、腐殖质、碱解氮、速效磷和速效钾)和酶活性(脲酶、过氧化氢酶、纤维素酶和蔗糖酶)的测定。番茄植株用清水冲洗根部泥土,用干净的吸水纸将植株根茎表面擦干净,然后将根系和茎部分开,分别放置于自封袋中,存于-4℃冰箱中,用于后续镉含量的测定。在盛果期时,收获番茄果实用于测定番茄产量、品质(维生素C含量、番茄红素含量、可溶性糖含量、糖酸比和可溶性蛋白含量)和镉含量。

1.3.2 番茄产量和品质的测定

番茄产量取每株番茄的果实总数。

番茄品质根据陈刚等^[23]的《植物生理学实验》进行测定,具体方法如下:维生素C含量采用2,6-二氯酚酚滴定法测定;番茄红素含量采用高效液相色谱法测定;可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝G-250染色法测定;可溶性糖含量用蒽酮比色法测定;有机酸含量用碱性滴定法测定;糖酸比(%)为可溶性糖含量与有机酸含量的比值。

1.3.3 番茄内镉含量的测定

番茄的根、茎和果实中的镉含量采用湿法(HNO₃-HClO₄)消解,原子吸收光度计ICE-3000测定^[24]。

1.3.4 土壤理化性质的测定

土壤理化性质根据鲍士旦^[25]的《土壤农化分析》进行测定,具体如下:土壤pH用pH计电位法测定,水

土比为2.5:1。土壤腐殖质含量用焦磷酸钠提取重铬酸钾法测定。土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定。土壤速效钾含量用NaOH熔融-火焰光度法测定。土壤速效磷含量用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定。

1.3.5 酶活性的测定

土壤酶活性根据关松荫^[26]的《土壤酶及其研究法》进行测定,具体方法如下:脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定,其活性以每1 d每1 g土生成铵态氮的量表示,单位为mg·g⁻¹·d⁻¹。过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,其活性以每20 min每1 g土壤消耗0.1 mol·L⁻¹高锰酸钾溶液的体积(mL)表示,单位为mL·g⁻¹·20 min⁻¹。蔗糖酶和纤维素酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,其活性以每1 d每1 g土生成葡萄糖的量表示,单位为mg·g⁻¹·d⁻¹。

1.4 傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

通过FTIR检测生物炭的化学官能团。将生物炭样品与KBr混合并研磨成细粉。FTIR分析在400~4 000 cm⁻¹波数范围内以4 cm⁻¹的分辨率进行,获得的红外光谱以相对于波数(cm⁻¹)的透射率的形式呈现。

1.5 数据分析

使用Excel 2019完成数据整理,采用SPSS 25.0统计分析软件进行单因素方差(One-way ANOVA)分析,不同处理之间采用Duncan's法进行多重比较($P < 0.05$),利用Origin 2021绘制柱形图和生物炭FTIR光谱图。同时,基于Spearman相关性分析计算番茄产量、品质与土壤理化性质、番茄体内镉含量的相关性大小,利用Origin 2021绘制相关性热图($P < 0.01$)。

2 结果与分析

2.1 FTIR 分析

生物炭的FTIR光谱图见图1。生物炭的主要特征峰如下:波数在746 cm⁻¹的吸收峰为芳香族C—H的弯曲振动;波数在1 028 cm⁻¹和1 055 cm⁻¹的吸收峰为多糖物质C—O键伸缩振动;波数在1 404 cm⁻¹的吸收峰为羧基(—COOH)的正反对称伸缩;波数在1 579 cm⁻¹的吸收峰为芳香族C=C的伸缩振动;波数在3 332 cm⁻¹的吸收峰为醇/酚羟基存在的缔合—OH伸缩振动。综上所述,该生物炭含有大量的C—H、C—O、—COOH、C=C和—OH官能团,且具有高度的芳香化。

2.2 生物炭对番茄各部位镉累积的影响

由图2可知,番茄根、茎中镉含量随生长发育进程的推进呈逐渐上升的趋势。镉含量在番茄根系中最高,其次为茎部和果实。在番茄生长末期,各处理

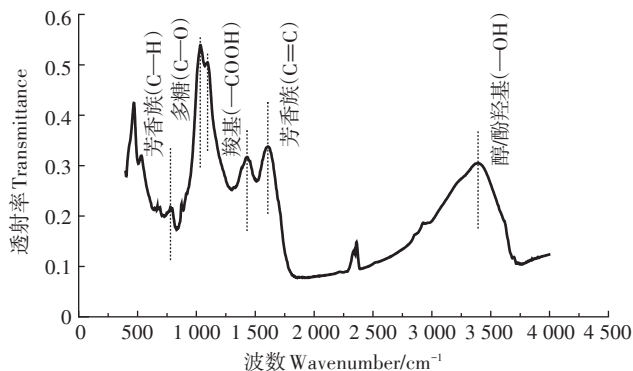
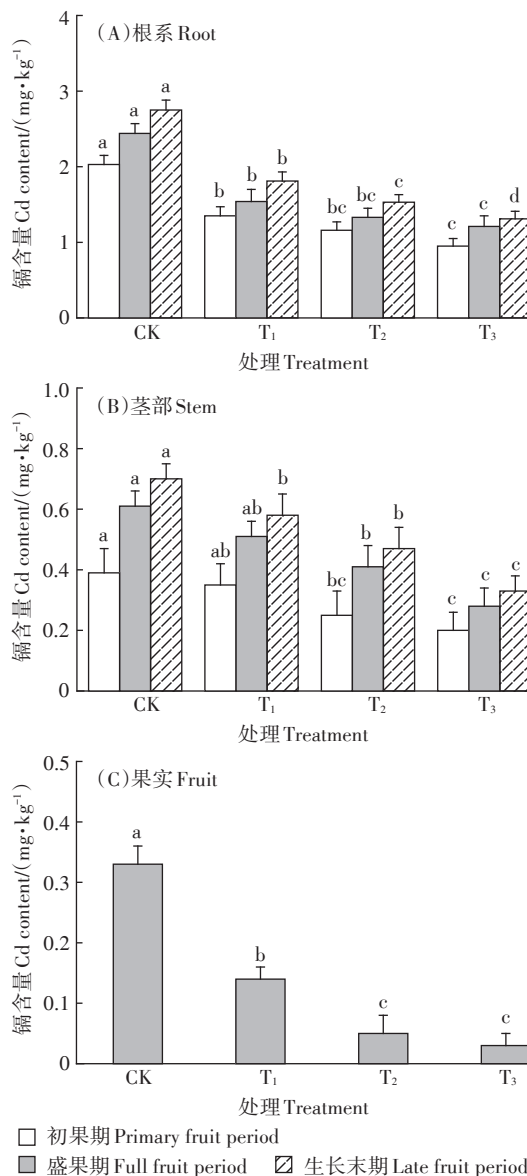


图1 生物炭FTIR光谱图

Figure 1 FTIR diagram of biochar



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below

图2 不同处理番茄体内的镉含量

Figure 2 The Cd content of tomato in different treatments

间的根系镉含量达到显著性差异($P<0.05$)。CK处理根系镉含量($2.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)最高, T_1 、 T_2 和 T_3 处理中根系镉含量分别为 1.81 、 $1.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较CK处理显著减少了34.18%、44.36%和52.36%(图2A)。番茄茎部镉含量变化趋势与根系相似(图2B), T_1 、 T_2 和 T_3 处理的镉含量显著低于CK处理($0.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 分别为 0.58 、 $0.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较CK处理降低了17.14%、32.86%和52.86%。 T_3 处理与 T_1 和 T_2 处理达到显著差异, 但 T_1 和 T_2 处理间差异不显著($P>0.05$)。由图2C可得, 与CK处理相比, T_1 、 T_2 和 T_3 处理均显著降低了番茄果实中的镉含量, T_2 和 T_3 处理之间无显著差异($P>0.05$)。 T_2 和 T_3 处理果实中的镉含量分别为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较CK处理($0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著降低84.8%和90.9%。由此可得, 添加生物炭能够显著减少重金属镉在番茄体内累积, 且随着生物炭含量的增加, 番茄体内累积的镉含量减少。

2.3 生物炭对番茄产量和品质的影响

由表1可知, T_2 处理的番茄产量显著高于 T_1 处理和 T_3 处理, 且三者均显著高于CK处理, 分别较CK提升了34.4%、74.7%和49.0%, 但 T_1 和 T_3 处理间未达到显著差异($P>0.05$)。添加生物炭对番茄品质有显著的提升作用, T_1 、 T_2 和 T_3 处理的果实中维生素C、番茄红素、可溶性蛋白、可溶性糖含量和糖酸比均显著高于CK处理($P<0.05$), 其中 T_2 处理提升效果最好。与CK处理相比, T_2 处理中维生素C、番茄红素、可溶性蛋白和可溶性糖含量显著提高了24.7%、114.4%、12.0%和37.4%。同时, T_2 处理的果实糖酸比为 $8.65\% \pm 0.15\%$, 在最佳范围($8.00\% \sim 9.00\%$)内, 且与其余处理达到显著差异($P<0.05$)。由此可见, 添加生物炭能够缓解镉带来的危害, 显著提高番茄的产量和维生素C、番茄红素、可溶性蛋白、可溶性糖含量和糖酸比, 其中以 T_2 处理提高效果最佳。

2.4 生物炭对土壤理化性质的影响

由图3可得, 在番茄生育期内, CK处理的土壤理化性质(pH、腐殖质)和养分含量(碱解氮、速效钾和速效磷)均呈下降趋势, 而生物炭处理则呈稳步上升的趋势, 且均显著高于CK处理($P<0.05$)。在番茄的生长末期, T_1 、 T_2 和 T_3 处理的pH分别为6.77、7.05和7.15, 较CK处理提高了1.75、2.02个和2.12个单位, T_2 和 T_3 处理间无显著差异($P>0.05$, 图3A)。 T_2 处理中土壤腐殖质含量为 $23.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于CK处理($9.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 T_1 处理($19.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但与 T_3 处理无显著差异($24.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) ($P>0.05$, 图3B)。由图3C可知, 在生长末期, T_2 处理中土壤碱解氮含量为 $47.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于CK处理($23.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 T_1 处理($43.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 T_3 处理($44.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), T_1 和 T_3 处理之间无显著差异($P>0.05$)。图3D和3E中, CK处理的速效钾和速效磷含量在番茄生长末期降至最小值, 而生物炭处理(T_1 、 T_2 和 T_3)则相反。 T_2 处理速效钾和速效磷含量显著高于其余处理, 分别为 $167.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $165.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较CK处理提升了287.88%和156.50% ($P<0.05$)。综上所述, 添加生物炭使土壤pH趋于中性, 同时显著提高土壤腐殖质含量和土壤养分含量, 其中以 T_2 处理效果最优。

2.5 生物炭对土壤酶活性的影响

由图4A可知, 在番茄的整个生育期内, T_1 、 T_2 和 T_3 处理的脲酶活性均与CK处理达到显著差异($P<0.05$), 且在盛果期达到最大值, 分别为 5.97 、 $6.70 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $6.22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 较CK处理提升了107.29%、132.64%和115.97%。在生长末期, T_2 处理与其余处理脲酶活性差异显著, T_1 和 T_3 处理无显著差异($P>0.05$)。在盛果期, T_2 处理的过氧化氢酶活性($3.47 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$)显著高于CK处理($1.66 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$)、 T_1 处理($2.94 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$)和 T_3 处理($3.16 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$)。而在生长末期, T_2 和 T_3 处理间的过

表1 不同处理对番茄产量和品质的影响

Table 1 Effects of different treatments on tomato yields and quality

处理 Treatment	产量 Yield	维生素C含量 Vitamin C content/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	番茄红素含量 Lycopene content/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	可溶性糖含量 Soluble sugar content/%	糖酸比 Sugar-acid ratio/%
CK	$80.33 \pm 7.37\text{c}$	$46.69 \pm 1.32\text{c}$	$4.17 \pm 0.27\text{c}$	$2.42 \pm 0.08\text{b}$	$4.81 \pm 0.15\text{c}$	$4.81 \pm 0.17\text{c}$
T_1	$108.00 \pm 7.94\text{b}$	$54.45 \pm 1.45\text{b}$	$7.91 \pm 0.22\text{b}$	$2.62 \pm 0.06\text{a}$	$5.90 \pm 0.19\text{b}$	$7.95 \pm 0.14\text{b}$
T_2	$140.33 \pm 7.02\text{a}$	$58.22 \pm 1.27\text{a}$	$8.94 \pm 0.25\text{a}$	$2.71 \pm 0.07\text{a}$	$6.60 \pm 0.18\text{a}$	$8.65 \pm 0.15\text{a}$
T_3	$119.67 \pm 7.37\text{b}$	$56.48 \pm 1.31\text{ab}$	$8.32 \pm 0.30\text{b}$	$2.66 \pm 0.06\text{a}$	$6.14 \pm 0.18\text{b}$	$8.21 \pm 0.13\text{b}$

注:同一列不同小写字母表示不同处理间存在显著差异($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).

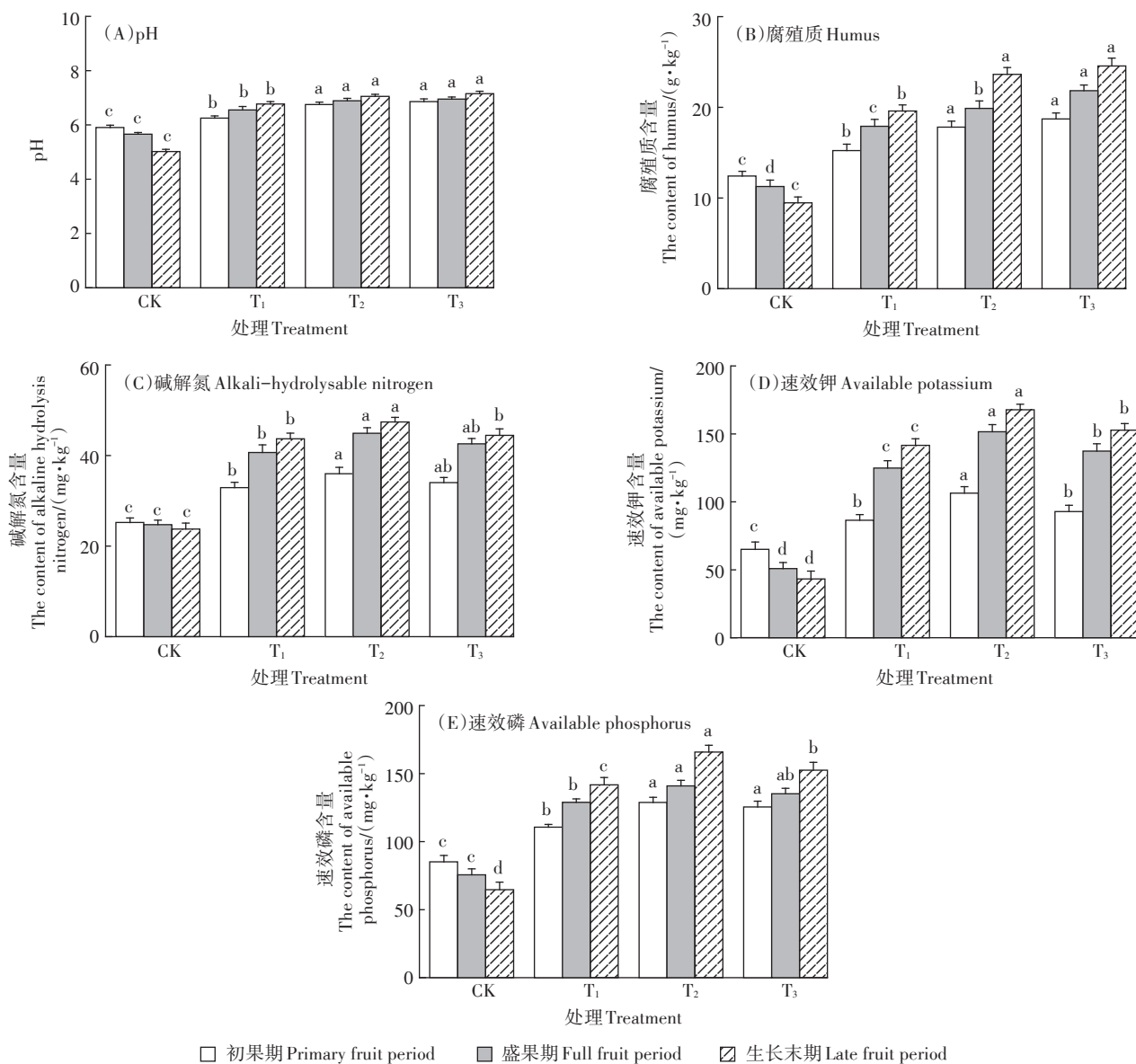


图3 不同处理对土壤理化性质的影响

Figure 3 Soil physicochemical properties in different treatments

氧化氢酶活性无显著差异 ($P>0.05$, 图 4B)。由图 4C 可得, CK 处理的蔗糖酶活性呈逐渐下降趋势, T_1 、 T_2 和 T_3 处理则呈先上升后下降的趋势, 并在盛果期达到最大值, 且各处理间均呈显著差异 ($P<0.05$), 分别为 0.94 、 $1.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.02 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。纤维素酶活性变化趋势与蔗糖酶相似, 且在番茄的整个生育期内, T_2 和其余处理间呈显著差异, T_1 和 T_3 处理间的纤维素酶活性无显著差异 ($P>0.05$, 图 4D)。在盛果期, T_2 处理纤维素酶活性 ($2.22 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 显著高于 CK 处理 ($1.37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)、 T_1 处理 ($1.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 和 T_3 处理 ($2.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。由此可得, 添加生物炭可以显著提高番茄土壤中脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和纤

维素酶的活性, 且酶活性在盛果期达到最高值, 其中 T_2 处理对酶活性促进效果更为显著。

2.6 相关性热图分析

在盛果期, 运用 Origin 2021 软件构建番茄产量、品质 (维生素 C、番茄红素、可溶性蛋白、可溶性糖含量和糖酸比) 与土壤理化性质、番茄体内 (根系、茎部和果实) 镉含量的相关性分析 ($P<0.01$), 得到相关性热图 (图 5)。腐殖质与番茄糖酸比的相关性系数为 0.73 , 呈显著正相关关系, 而与番茄的产量、维生素 C、番茄红素、可溶性蛋白和可溶性糖含量的相关性不显著。pH 与番茄的番茄红素、可溶性蛋白含量和糖酸比的相关系数为 $0.73 \sim 0.76$, 呈显著正相关关系, 而与

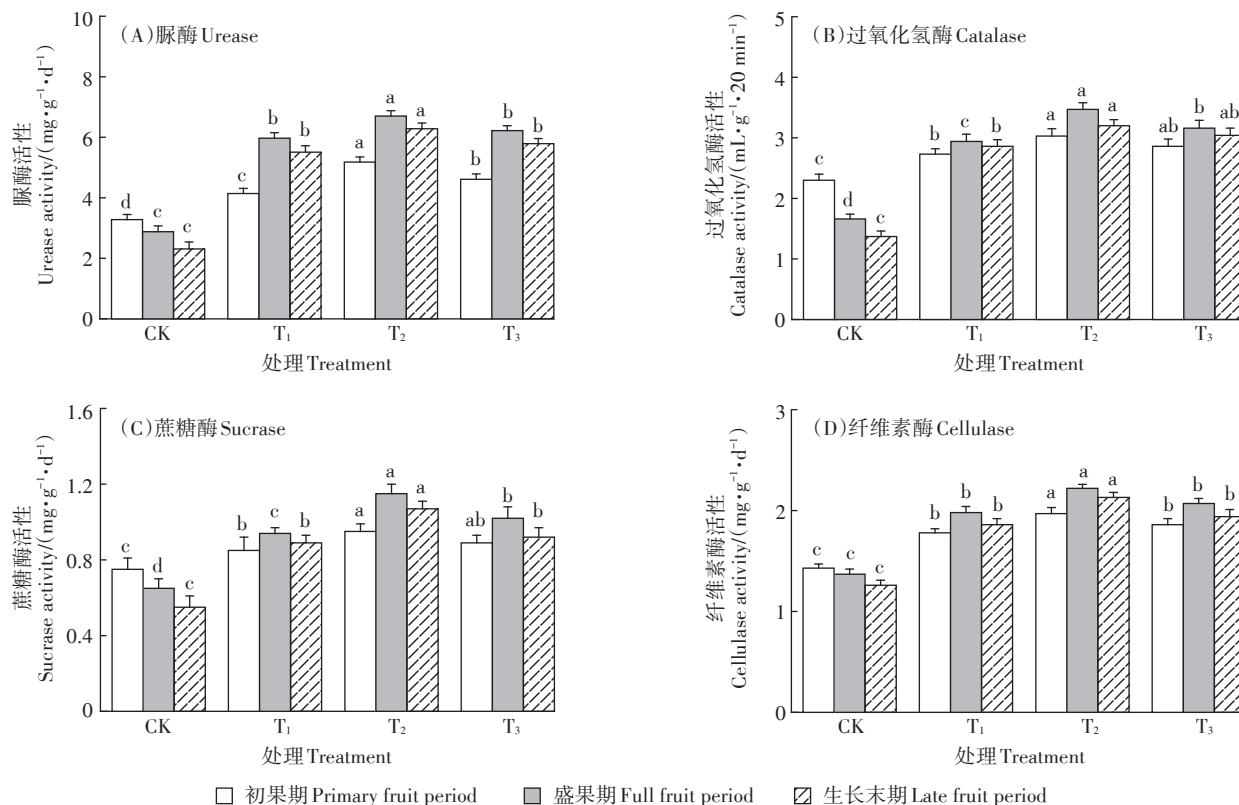
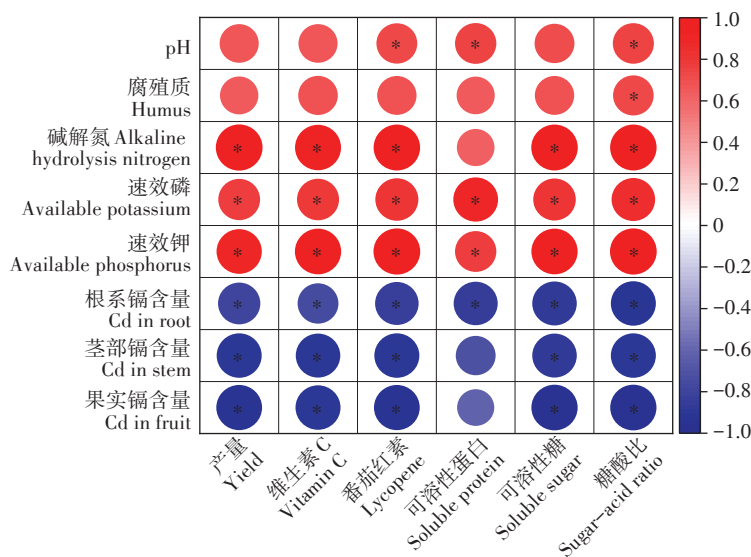


图4 不同处理对土壤酶活性的影响

Figure 4 Soil microbial and enzyme activity in different treatments



“*”表示在0.01水平上显著相关
“*” means the correlation is significant at 0.01 level

图5 番茄产量和品质与土壤理化性质和番茄镉含量的相关性热图

Figure 5 Correlation heatmap of tomato yield and quality with soil physicochemical properties and the Cd concentration of tomato

番茄的产量、维生素C和可溶性糖含量的相关性不显著。碱解氮含量与番茄的产量和品质(除可溶性蛋白含量外)的相关性系数为0.94~0.97,呈显著正相关关系。速效磷和速效钾含量与番茄的产量和品质呈显

著正相关关系。番茄根系镉含量与番茄的产量和品质的相关系数为-0.74~-0.90,呈显著负相关关系;番茄茎部和果实镉含量与番茄的产量和品质(除可溶性蛋白含量外)的相关系数为-0.88~-0.95,呈显著负相

关关系,而与可溶性蛋白含量相关性不显著。

3 讨论

3.1 生物炭施入对镉在番茄体内累积的影响

重金属含量是评价食品安全的一项重要指标^[27]。研究表明,番茄体内的镉主要是由根系从土壤中吸收镉,并通过木质部长距离运送到茎部和果实^[28]。本研究表明,不同比率的生物炭施入均可显著降低番茄体内(根系、茎部和果实)镉含量,施入3%和5%的生物炭均使番茄果实中镉含量符合《食品安全国家标准:食品中污染物限量》(GB 2762—2012)中的标准值($\leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。生物炭可通过其自身的多孔隙结构和强吸附力与土壤中的镉结合形成沉淀,降低土壤中镉的生物有效性,减少其被植株吸收富集的量^[3]。黄雁飞等^[9]通过施用秸秆生物炭降低了水稻体内的镉含量,其中4.5%桑树枝秆生物炭效果最佳,降镉效果与本研究结果相似。研究表明,pH是影响土壤有效镉含量的重要因素之一^[11]。在本研究中,与不添加生物炭的处理相比,施用生物炭的土壤pH显著提高。土壤pH的增加有利于土壤表面呈负电性,增加土壤粒子与镉的结合位点^[13]。同时,高pH有利于土壤溶液中氢氧根和碳酸根离子的形成,镉可与之结合生成难溶的 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 和 CdCO_3 沉淀,进一步阻碍了作物对镉的吸收^[29]。同时也有研究表明,土壤pH的升高会增强土壤胶体及土壤黏粒对重金属离子的吸附能力,改变土壤镉的存在形态,抑制镉的流动性^[30]。王义祥等^[10]的研究表明生物炭主要通过提高土壤pH减少土壤中有有效态镉含量和镉的生物有效性,进而降低水稻对镉的吸收能力,这与本研究结果相似。此外,腐殖质和速效磷被认为可以减少土壤有效态镉含量,其通过将可交换态镉固定在土壤中,从而减少镉的生物可利用度^[31-32]。GU等^[32]发现土壤腐殖质和速效磷含量的升高导致甜菜根部对镉的吸收减少,进而减少甜菜茎部和叶子的镉含量,这与本研究结果相似。本研究表明生物炭可有效抑制番茄对镉的吸收,降低番茄作物中镉的健康风险。

3.2 生物炭施入对番茄品质和产量的影响

番茄的品质和产量受到很多因素的影响,重金属污染会阻碍番茄的正常生长发育,进而影响其品质和产量^[6,15]。本研究结果发现施入生物炭显著提升镉污染土壤中番茄的品质和产量,其中3%生物炭提高效果最为显著。由于生物炭具有较大的比表面积,同时还富含芳香结构和含氧官能团,能够有效吸附固定土

壤中的镉^[33],进而减少镉对番茄的胁迫作用。此外,生物炭有疏松多孔的结构和较高的全碳含量,可以改善土壤的理化特性和保水能力,并且适于土壤微生物的生存^[15]。同时生物炭可改变土壤容重和增加土壤孔隙度,有利于番茄根系生长,从而促进番茄植株对营养成分的吸收能力,进而提高番茄产量^[34]。AKHTAR等^[35]研究了生物炭比率对温室生长的番茄的影响,表明高生物炭比率(3%)可提高原有番茄产量的30%,与本研究结果相似。李昌见等^[18]报道 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量使番茄增产51.6%,而 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭施用量仅增产49.6%,说明过高的生物炭施用量可能会降低番茄产量。同时有研究指出适量生物炭的添加也可促进番茄品质的提升^[36],本研究表明向土壤中施入3%的生物炭显著增加了番茄的维生素C、番茄红素、可溶性蛋白和可溶性糖含量,这可能是因为施入生物炭增加了叶片的光合和蒸腾速率,增加番茄叶绿素含量和叶面积,进而促进了光合产物向果实的运输,并且提高了植株氮、磷和钾的利用效率,提高了番茄品质^[6,16,35]。AGBNA等^[22]发现,添加生物炭显著增加番茄维生素C和可溶性糖的含量,可能归因于生物炭能够改善土壤的保水能力和增加土壤养分含量(碱解氮、速效磷和速效钾)。本研究中, T_1 、 T_2 和 T_3 处理的土壤养分含量显著高于CK处理,且相关性热图显示土壤养分含量均和番茄的产量、品质呈显著正相关关系(图5),也证实了这一观点。ALMA-ROAI等^[15]的研究表明,在适量生物炭施用量下番茄的维生素C、番茄红素和可溶性糖含量分别增加了39%、24%、29%,这与本研究结果相似。

3.3 生物炭施入对镉污染土壤理化性质的影响

生物炭作为改善环境的外源材料,能够直接有效地改善土壤的理化性质^[9,16]。本研究表明,添加生物炭的处理可显著改善土壤理化性质(pH、腐殖质)并提高养分含量(碱解氮、速效磷和速效钾),其中3%生物炭处理对土壤养分含量提高效果最显著,与5%生物炭处理对土壤理化性质的影响无显著差异。生物炭具有较高的pH,同时可向土壤释放更多的碳酸盐、氧化物和氢氧化物,从而增加土壤pH^[6,28]。此外,生物炭在微生物的作用下形成土壤腐殖质,同时生物炭缓慢的分解有利于腐殖质的形成,可长期有效地促进土壤腐殖质的提高^[37-38]。QUAN等^[39]发现镉污染土地中施入生物炭可显著提高0~20 cm表层土壤的腐殖质含量,这与本研究结果相似。另外,生物炭富含氮、磷、钾等元素,加入土壤中起直接补充作用^[3,16]。

生物炭的施入显著提高了与氮、磷、钾循环相关的微生物活性,进一步提高碱解氮、速效磷和速效钾的含量^[40]。张海晶等^[41]的研究表明玉米秸秆生物炭显著提高土壤的pH和碱解氮、速效磷、速效钾含量,这与本研究结果相似。此外,生物炭的添加有利于形成并提高土壤团聚体的稳定性,促进土壤氮的矿化作用,从而减少土壤氮素的淋失^[42]。化肥具有肥效快、不持久的特性^[43]。生物炭因具有较高的吸附性能,而能够吸附固定土壤的速效钾和速效磷。随着番茄的生长发育、生物炭的老化及番茄和土壤微生物促进有机质的分解,生物炭吸附固定的速效磷和速效钾缓慢释放^[44-46]。在两者的共同作用下,土壤的速效磷和速效钾含量随着番茄的生长而升高。崔虎等^[47]发现生物炭能够提高土壤氮、钾元素的滞留能力,进而提高作物对土壤养分的利用率。魏永霞等^[48]发现连续4 a施用生物炭,土壤pH、碱解氮和速效钾含量随着施炭量增加而升高。同时,研究表明较高的生物炭施用量对土壤氮素起固持作用且导致土壤C/N过高,从而降低微生物和酶活性,进而减少土壤中有效氮、磷和钾等的含量^[34],这也证实了本研究中T₃处理的土壤养分含量显著低于T₂处理的结果。因此3%生物炭的添加量更有利于提高土壤pH和腐殖质含量,促进并维持土壤的养分。

3.4 生物炭施入对镉污染土壤酶活性的影响

酶活性是反映土壤肥力和质量的指标之一,在土壤养分循环中起重要作用,其活性与植物生长密切相关^[30]。脲酶是促进土壤中氮素转化的酶^[49]。过氧化氢酶可直接改变重金属离子价态以实现重金属解毒^[50]。蔗糖酶和纤维素酶是催化碳循环的酶^[19]。本研究表明,CK处理番茄土壤中酶(脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和纤维素酶)活性均显著降低,而添加生物炭的处理,可消除镉对酶活性的抑制作用,并使各个酶活性显著提高。重金属镉因其高毒性而会损伤细胞和使土壤微生物死亡,同时镉也会与酶巯基反应,或与底物发生螯合反应,产生与底物的竞争性抑制,进而导致酶活性下降^[5,51]。而生物炭可以吸附固定土壤中的镉,与镉形成络合物,进一步降低了有效态镉含量和生物可利用度,从而减轻镉对土壤微生物的毒害作用^[52]。研究表明在镉污染土壤中添加2%生物炭提高了过氧化氢酶活性,减少植物组织细胞膜的破裂^[12]。同时,生物炭自身巨大的比表面积及丰富的孔隙结构,为微生物提供良好的栖息环境,促进微生物的生长^[47]。此外,生物炭通过自身的多孔结构和较强

的吸附性能,可以吸附酶促反应底物,为土壤酶提供更多的结合位点,进而提高土壤酶活性^[53]。生物炭还可通过促进水分保持,增加土壤的孔隙度来增强酶活性^[54]。王焱等^[55]的研究表明施入生物炭增加了土壤稳定的碳组分,调节了土壤水肥平衡,为酶促反应提供了充足的底物和良好的条件,进而提高了土壤酶活性。同时,pH和土壤阳离子交换能力的提高也对酶活性有积极的影响^[56]。因此,酶活性的增强与土壤pH增加、土壤养分淋失减少及施用生物炭降低了镉的生物可利用度有关^[57-58]。此外,TU等^[56]的研究表明1%生物炭能明显提高脲酶和过氧化氢酶活性,而5%生物炭则使酶活性降低,主要是因为高比率的生物炭对土壤微生物产生了有害影响。王豪吉等^[19]的研究表明,与1%生物炭相比,3%生物炭显著提高了土壤的脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性,本研究结果也证实了上述的观点。在本研究中,施用生物炭对土壤酶活性起到了促进作用,其中3%生物炭处理的土壤酶活性提高效果最为显著,表明土壤中添加3%生物炭为较适宜的添加量。

4 结论

(1)番茄根系、茎部和果实中镉的累积随着生物炭添加量的增加而减少,3%生物炭处理中番茄体内镉含量已达到国家食品安全标准要求。

(2)添加生物炭显著提高土壤中脲酶、蔗糖酶、纤维素酶和过氧化氢酶的活性,改善土壤的生态环境。

(3)生物炭通过吸附固定土壤中的镉,抑制了番茄对镉的吸收,提高了土壤pH、腐殖质、速效氮、速效磷和速效钾的含量,从而提高番茄产量和果实的维生素C、番茄红素、可溶性蛋白、可溶性糖含量和糖酸比。综合以上研究结果,施用3%的生物炭提升效果最佳。

参考文献:

- [1] BRUNETTI G, TRAVERSA A, MASTRO F D, et al. Short term effects of synergistic inorganic and organic fertilization on soil properties and yield and quality of plum tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 252: 342-347.
- [2] ZHANG C, LI X Y, YAN H F, et al. Effects of irrigation quantity and biochar on soil physical properties, growth characteristics, yield and quality of greenhouse tomato[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 241: 106263.
- [3] 王义, 王勃然, 周文涛, 等. 生物炭与水分管理耦合对晚稻镉迁移与积累的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(7): 1479-1485.

- WANG Y, WANG B R, ZHOU W T, et al. Effects of biochar application and water management coupling on cadmium transfer and accumulation in late-season rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7):1479-1485.
- [4] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9):1689-1692. CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9):1689-1692.
- [5] 黄家庆, 赖永翔, 翁伯琦, 等. 花生壳生物炭对镉污染菜园土壤细菌群落结构的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(5):1115-1128. HUANG J Q, LAI Y X, WENG B Q, et al. Effect of peanut shell biochar on the bacterial community structure in cadmium-containing vegetable soil[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(5):1115-1128.
- [6] ZEESHAN M, AHMAD W, HUSSAIN F, et al. Phytostabilization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255:120318.
- [7] 何梓林, 鲜杨, 孟晓霞, 等. 菌渣生物炭对镉污染土壤性质及小白菜吸收镉的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1):340-344, 352. HE Z L, XIAN Y, MENG X X, et al. Effects of mushroom residues biochar on properties of cadmium-contaminated soil and Cd uptake by Chinese cabbage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1):340-344, 352.
- [8] 赵莎莎, 肖广全, 陈玉成, 等. 不同施用量石灰和生物炭对稻田镉污染钝化的延续效应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1):334-340. ZHAO S S, XIAO G Q, CHEN Y C, et al. Continuous effect of different application rates of lime and biochar on the passivation of cadmium pollution in paddy fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1):334-340.
- [9] 黄雁飞, 陈桂芬, 熊柳梅, 等. 不同作物秸秆生物炭对水稻镉吸收的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(10):2364-2369. HUANG Y F, CHEN G F, XIONG L M, et al. Effects of different crop straw biochars on cadmium absorption in rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(10):2364-2369.
- [10] 王义祥, 赖永翔, 叶菁, 等. 生物炭对不同镉污染土壤钝化效果和小白菜镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(3):713-718. WANG Y X, LAI Y X, YE J, et al. Effects of biochar on passivation and uptake of cadmium by *Brassica chinensis* in cadmium-polluted soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(3):713-718.
- [11] 吴岩, 杜立宇, 梁成华, 等. 生物炭与沸石混施对不同污染土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1):286-290. WU Y, DU L Y, LIANG C H, et al. Influence of fixed addition of biochar and natural zeolite on the fraction transform of cadmium in different contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1):286-290.
- [12] BASHIR S, QAYYUM M A, HUSAIN A, et al. Efficiency of different types of biochars to mitigate Cd stress and growth of sunflower (*Helianthus*; L.) in wastewater irrigated agricultural soil[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, 28(4):2453-2459.
- [13] BASHIR S, HUSSAIN Q, SHAABAN M, et al. Efficiency and surface characterization of different plant derived biochar for cadmium (Cd) mobility, bioaccessibility and bioavailability to Chinese cabbage in highly contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2018, 211:632-639.
- [14] 刘冲, 刘晓文, 吴文成, 等. 生物炭及炭基肥对油麦菜生长及吸收重金属的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10):3064-3070. LIU C, LIU X W, WU W C, et al. Effect of biochar and biochar based fertilizer on growth of *Lactuca sativa* L. and absorption of heavy metals[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10):3064-3070.
- [15] ALMAROAI Y A, EISSA M A. Effect of biochar on yield and quality of tomato grown on a metal-contaminated soil[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 265:109210.
- [16] 李新宇, 孟康, 李小英, 等. 生物炭对元谋燥红壤土壤肥力与番茄生长的影响[J]. 西部林业科学, 2019, 48(2):114-120. LI X Y, MENG K, LI X Y, et al. Effects of biochar on soil fertility and tomato growth in Yuanmou dry red soil[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2019, 48(2):114-120.
- [17] 王昆艳, 官会林, 卢俊, 等. 生物质炭施用量对旱地酸性红壤理化性质的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3):503-509. WANG K Y, GUAN H L, LU J, et al. Effects of biochar on physicochemical properties of dry land acid red soil[J]. *Soils*, 2020, 52(3):503-509.
- [18] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥利用效率与番茄生长影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11):2187-2193. LI C J, QU Z Y, GOU M M, et al. Effects of biochar amendment on soil water and nutrient utilization efficiencies and tomato growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2187-2193.
- [19] 王豪吉, 施梦馨, 徐应垚, 等. 生物炭与有机肥配施对耕地红壤酶活性及作物产量的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2021, 41(1):56-63. WANG H J, SHI M X, XU Y Y, et al. Effects of the combined application of biochar and organic fertilizer on the soil enzyme activity and crop yield of cultivated red soil[J]. *Journal of Yunnan Normal University(Natural Sciences Edition)*, 2021, 41(1):56-63.
- [20] AGBNA G H D, SHE D L, LIU Z P, et al. Effects of deficit irrigation and biochar addition on the growth, yield, and quality of tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 222:90-101.
- [21] AGBNA G, ALI A B, BASHEER A K, et al. Influence of biochar amendment on soil water characteristics and crop growth enhancement under salinity stress[J]. *International Journal of Engineering Works*, 2017, 4:2409-2770.
- [22] LEVESQUE V, JEANNE T, DORAIS M, et al. Biochars improve tomato and sweet pepper performance and shift bacterial composition in a peat-based growing medium[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 153:103579.
- [23] 陈刚, 李胜. 植物生理学实验[M]. 北京:高等教育出版社, 2016. CHEN G, LI S. Plant physiology experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016.
- [24] 柴冠群, 杨娇娇, 范成五, 等. 镉高地质背景区设施栽培对土壤与蔬菜镉积累的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(6):1489-1495. CHAI G Q, YANG J J, FAN C W, et al. Impact of greenhouse cultivation on the accumulation of cadmium in soils and vegetables from an area

- with a high geochemical background of cadmium[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(6):1489-1495.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [26] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. GUAN S Y. Soil enzyme and research methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.
- [27] 陈永勤, 江玲, 徐卫红, 等. 黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(12):4642-4650. CHEN Y Q, JIANG L, XU W H, et al. Effect of ryegrass and arbuscular mycorrhizal on Cd absorption by varieties of tomatoes and cadmium forms in soil[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12):4642-4650.
- [28] 潘建清, 陆敏, 杨肖娥. 不同小麦品种灌浆期生长和镉积累的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4):756-765. PAN J Q, LU M, YANG X E. Variations in growth and cadmium accumulation among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars during the grain filling stage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4):756-765.
- [29] BASHIR A, RIZWAN R, REHMAN M Z U, et al. Application of co-composted farm manure and biochar increased the wheat growth and decreased cadmium accumulation in plants under different water regimes[J]. *Chemosphere*, 2020, 246:125809.
- [30] 黄洋, 郭晓, 胡学玉. 生物炭对磷镉富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(6):2861-2868. HUANG Y, GUO X, HU X Y. Effects of biochar on bioavailability of two elements in phosphorus and cadmium-enriched soil and accumulation of cadmium in crops[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6):2861-2868.
- [31] 王向琴, 刘传平, 杜衍红, 等. 零价铁与腐殖质复合调理剂对稻田镉污染钝化的效果研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12):2329-2336. WANG X Q, LIU C P, DU Y H, et al. Effects of stabilizing remediation of Cd and As in paddy rice by applying combined zero-valent iron and humus[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(12):2329-2336.
- [32] GU P X, ZHANG Y M, XIE H H, et al. Effect of cornstalk biochar on phytoremediation of Cd-contaminated soil by *Beta vulgaris* var. *cicla* L.[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 205:111144.
- [33] WEI L, HUANG Y F, HUANG L X, et al. Combined biochar and soda residues increases maize yields and decreases grain Cd/Pb in a highly Cd/Pb-polluted acid ultisols soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 306:107198.
- [34] 张瑞花, 兰超杰, 刘雯, 等. 生物炭对反季节露地樱桃番茄生长及产量品质的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(14):4831-4839. ZHANG R H, LAN C J, LIU W, et al. Effect of biochar on growth, yield and quality of open-field cherry tomato in counter season[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(14):4831-4839.
- [35] AKHTAR S S, LI G T, ANDERSEN M N, et al. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 138:37-44.
- [36] GUO L L, YU H W, KHARBACH M, et al. Biochar improves soil-to-mato plant, tomato production, and economic benefits under reduced nitrogen application in northwestern china[J]. *Plants*, 2021, 10(4).
- [37] ZHANG Y F, WANG J M, FENG Y. The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review[J]. *Catena*, 2021, 202(2):105284.
- [38] 白嘉骏, 刘松健, 窦森, 等. 田间自然陈化生物炭组成特征及对黑土有机碳的影响[J/OL]. 吉林农业大报:1-13[2021-08-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20210617.1115.004.html>. BAI J J, LIU S J, DOU S, et al. The composition characteristics of natural aging biochar in the field and its effects on soil organic carbon in black soil[J/OL]. *Journal of Jilin Agricultural University*:1-13[2021-08-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20210617.1115.004.html>.
- [39] QUAN G X, FAN Q Y, SUN J X, et al. Characteristics of organo-mineral complexes in contaminated soils with long-term biochar application[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 384:121265.
- [40] 何秀峰, 赵丰云, 于坤, 等. 生物炭对葡萄幼苗根际土壤养分、酶活性及微生物多样性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6):19-26. HE X F, ZHAO F Y, YU K, et al. Effect of biochar on nutrient, enzyme activities and microbial diversity of rhizosphere soil of grape seedlings[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(6):19-26.
- [41] 张海晶, 王少杰, 田春杰, 等. 玉米秸秆及其生物炭对东北黑土溶解有机质特性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2):243-250. ZHANG H J, WANG S J, TIAN C J, et al. Effects of maize straw and its biochar on the dissolved organic matter characteristics of black soil in northeastern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2):243-250.
- [42] 邵慧芸, 张阿凤, 李紫玥, 等. 生物炭对烤烟生长、根际土壤性质及叶片重金属含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(8):46-53, 64. SHAO H Y, ZHANG A F, LI Z Y, et al. Effects of biochar amendment on tobacco growth, rhizosphere soil properties and heavy metals contents in tobacco leaf[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(8):46-53, 64.
- [43] MUHAMMAD Q, HUANG J, WAQAS A, et al. Yield sustainability, soil organic carbon sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 198:104569.
- [44] TIAN J H, KUANG X Z, TANG M T, et al. Biochar application under low phosphorus input promotes soil organic phosphorus mineralization by shifting bacterial *phoD* gene community composition[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 779:146556.
- [45] LIU L Y, TAN Z X, GONG H B, et al. Migration and transformation mechanisms of nutrient elements (N, P, K) within biochar in straw-biochar-soil-plant systems: A review[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(1):22-32.
- [46] 卢慧宇, 杜文婷, 张弘毅, 等. 水肥管理与生物炭对作物产量和氮效率及氮淋失的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3):75-85. LU H Y, DU W T, ZHANG H T, et al. Effects of water and fertilizer management and biochar on crop yield, nitrogen efficiency and nitrogen leaching loss[J]. *Journal of Northwest A&F*

- University(Natural Science Edition), 2021, 49(3):75-85.
- [47] 崔虎, 王莉霞, 欧洋, 等. 生物炭-化肥配施对稻田土壤氮磷迁移转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(2):412-421. CUI H, WANG L X, OU Y, et al. Effect of the combined application of biochar and chemical fertilizer on the migration and transformation of nitrogen and phosphorus in paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(2):412-421.
- [48] 魏永霞, 石国新, 冯超, 等. 黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5):285-294. WEI Y X, SHI G X, FENG C, et al. Effects of applying biochar on soil comprehensive fertility and soybean growth in black soil area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(5):285-294.
- [49] 罗舒文, 甄珍, 李文清, 等. 两种生态型蚯蚓对四环素污染土壤中酶活性和细菌群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2):321-330. LUO S W, ZHEN Z, LI W Q, et al. Ecological effects of two earthworms on the enzymic activity and bacterial community structure in tetracycline-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2):321-330.
- [50] YANG J S, YANG F L, YANG Y, et al. A proposal of "core enzyme" bioindicator in long-term Pb-Zn ore pollution areas based on topsoil property analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 213:760-769.
- [51] TANG J Y, ZHANG L H, ZHANG J C, et al. Physicochemical features, metal availability and enzyme activity in heavy metal-polluted soil remediated by biochar and compost[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701:134751.
- [52] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 施用生物炭对红壤性水稻土重金属钝化与土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3):298-304. GUO B L, CHEN X M, JING F, et al. Effects of biochar application on heavy metal passivation and soil fertility in the red paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3):298-304.
- [53] 杜倩, 黄容, 李冰, 等. 生物炭还田对植烟土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(6):1440-1450. DU Q, HUANG R, LI B, et al. Effect of biochar returning on labile organic carbon and enzyme activity in tobacco-growing soil[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(6):1440-1450.
- [54] OLESZCZUK P, JOSKO I, FUTA B, et al. Effect of pesticides on microorganisms, enzymatic activity and plant in biochar-amended soil[J]. *Geoderma*, 2014, 214/215:10-18.
- [55] 王垚, 胡洋, 马友华, 等. 生物炭对镉污染土壤有效态镉及土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4):979-985. WANG Y, HU Y, MA Y H, et al. Effect of biochar addition on soil available cadmium and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(4):979-985.
- [56] TU C, WEI J, GUAN F, et al. Biochar and bacteria inoculated biochar enhanced Cd and Cu immobilization and enzymatic activity in a polluted soil[J]. *Environment International*, 2020, 137:105576.
- [57] EL-BASSI L, AZZAZ A A, JELLALI S, et al. Application of olive mill waste-based biochars in agriculture: Impact on soil properties, enzymatic activities and tomato growth[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755:142531.
- [58] ALI A, GUO D, JEYASUNDAR P G S A, et al. Application of wood biochar in polluted soils stabilized the toxic metals and enhanced wheat (*Triticum aestivum*) growth and soil enzymatic activity[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184:109635.