

胡广宇,宋 旻. 不同热解温度园林废弃物生物质炭对设施连作番茄产量、品质及青枯病的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(23):156-161.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.23.028

不同热解温度园林废弃物生物质炭对设施连作番茄产量、品质及青枯病的影响

胡广宇,宋 旻

(商丘师范学院生物与食品学院,河南商丘 476000)

摘要:以园林废弃物为原料,分别在 300、500、700 ℃ 条件下热解制备生物质炭,分析制备温度对生物质炭理化性质及设施连作番茄产量、品质及青枯病的影响。结果表明,随着热解温度的升高,园林废弃物生物质炭产率、H 和 O 元素含量逐渐降低,C、N、P 元素含量逐渐升高,而比表面积、总孔体积、微孔孔容、微孔率及平均孔径则先升高后降低;设施连作番茄产量、品质及青枯病防治效果均随热解温度升高而先升高后降低,以 500 ℃ 制备温度最佳。与 CK 相比,T500 处理的番茄单果质量、单株产量、维生素 C 含量、可溶性糖含量、可溶性固形物含量、番茄红素含量及青枯病防治效果分别显著提升 36.86%、43.13%、51.59%、35.02%、27.12%、37.44%、77.99% ($P < 0.05$),可滴定酸显著降低 18.18% ($P < 0.05$),糖酸比显著提升 64.99% ($P < 0.05$)。

关键词:园林废弃物;热解温度;生物质炭;连作番茄;青枯病

中图分类号: S641.204 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)23-0156-06

园林废弃物是指园林绿化植物在生长过程中

因衰老脱落或人工修剪而产生的植物残体,包括枯枝落叶、残花落果及死亡植株等^[1]。园林绿化具有美化环境、净化空气、缓解热岛效应等作用,是城市规划和建设中必不可少的重要一环。近年来,随着人们对精神生活需求的日益提高,“生态城市”和“森林城市”建设持续推进,城市园林绿化面积迅速增加,导致大量园林废弃物的急剧增加^[2]。园林废

收稿日期:2021-04-08

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:182102110198)。

作者信息:宋 旻(1981—),男,河南商丘人,博士,副教授,主要从事植物分子遗传学研究。E-mail:songyangc@163.com。

通信作者:胡广宇,硕士,中级实验师,主要从事植物生理学研究。

E-mail:hgy5990@163.com。

2018,238:246-254.

[21] Leng F, Sun S, Jing Y, et al. A rapid and sensitive method for determination of trace amounts of glucose by anthrone-sulfuric acid method[J]. Bulg Chem Commun, 2016, 48(1): 109-113.

[22] Smolskaite L, Venskutonis P R, Talou T. Comprehensive evaluation of antioxidant and antimicrobial properties of different mushroom species[J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 60(1): 462-471.

[23] 黄 英, 杜正彩, 侯小涛, 等. 黄芪药渣化学成分、药理及应用研究进展[J]. 中国中医药信息杂志, 2019, 26(6): 140-144.

[24] Zervakis G, Philippoussis A, Ioannidou S, et al. Mycelium growth kinetics and optimal temperature conditions for the cultivation of edible mushroom species on lignocellulosic substrates[J]. Folia Microbiol, 2001, 46(3): 231-234.

[25] 金 茜, 令狐金卿, 李华刚, 等. 不同基质培养下秀珍菇中蛋白质营养价值评价[J]. 食品科技, 2017, 42(3): 79-83.

[26] 黄清铨, 王庆福, 张柳莲, 等. 甘蔗渣栽培的不同颜色侧耳中的氨基酸组成与蛋白质营养评价[J]. 北方园艺, 2019(10): 127-133.

[27] 阮 鸣, 霍光明, 张李阳, 等. 新型与市售平菇香气成分的 GC-MS 分析与比较[J]. 食品工业科技, 2016, 37(10): 72-76, 81.

[28] Jin Y X, Hu X Y, Shen Y J, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic effects of polysaccharides separated from *Heridium erinaceus*[J]. J Invest Med, 2015, 63(8): S33-S.

[29] Hao L J, Xie Y X, Wu G K, et al. Protective effect of *Heridium erinaceus* on alcohol induced hepatotoxicity in mice[J]. Evid-Based Compl Alt, 2015(17): 1-5.

[30] Zan X Y, Cui F J, Li Y H, et al. *Heridium erinaceus* polysaccharide-protein HEG-5 inhibits SGC-7901 cell growth via cell cycle arrest and apoptosis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 76: 242-253.

[31] Wolters N, Schembecker G, Merz J. Erinacine C: a novel approach to produce the secondary metabolite by submerged cultivation of *Heridium erinaceus*[J]. Fungal Biol, 2015, 119(12): 1334-1344.

[32] Wang K, Bao L, Qi Q, et al. Erinacerins C-L, isoindolin-1-ones with alpha-glucosidase inhibitory activity from cultures of the medicinal mushroom *Heridium erinaceus*[J]. Journal of Natural Products, 2015, 78(1): 146-54.

[33] 杨晓霞, 张 伟, 韦静宜, 等. 栽培技术对秀珍菇富集铅与镉的影响及培养基安全限量值的研究[J]. 北方园艺, 2019(11): 122-128.

弃物富含 N、P、K、Ca 等营养元素,填埋、焚烧等传统处置方式不仅会导致资源浪费,而且会对环境造成污染^[3]。园林废弃物资源化利用是未来低碳经济和低碳城市发展的重要方向之一。

目前,好氧发酵堆肥和热解炭化是园林废弃物资源化利用的主要途径^[1]。生物质炭是一种难溶的固态产物,具有较大的比表面积、丰富的孔隙结构及较高的碳素含量和阳离子交换量等优势,已在固碳减排、环境治理、土壤改良及病虫害防治等方面得到广泛应用^[4-9]。生物质炭理化性状及产品性能与原材料、热解温度、热解时间等密切相关。Alexis 等研究发现,原材料 C 元素含量越高,生物质炭产品 C 元素含量也越高^[10];高秀红等研究表明,随着热解温度升高,生物质炭产率逐渐降低,比表面积、总孔容及平均孔径逐渐升高,对水中 4-硝基酚的去除效果逐渐增强^[11];而杨兴等则研究发现,烟杆炭比表面积在热解温度为 500 ℃ 时达到最大,超过 500 ℃ 又开始降低^[12];田雪等研究表明,随着炭化时间延长,树枝生物炭对 P 的解吸能力基本保持不变,而树叶生物炭则逐渐降低^[13]。由此可见,原材料、热解温度及热解时间对生物质炭理化性质及产品性能具有明显影响,在生物质炭产品推广应用中起关键作用。然而,目前关于热解温度对园林废弃物生物质炭理化性质方面的影响尚不多见,而不同热解温度生物质炭对设施连作番茄产量、品质及青枯病抗性方面的影响更是未见相关报道。

因此,本研究以西安市园林废弃物为原料,分析热解温度对生物质炭理化性质的影响并进一步分析不同制备温度生物质炭对设施连作番茄产量、品质及青枯病抗性的影响,以期为园林废弃物资源化及在设施农业生产领域的利用提供一定的理论依据和技术参照。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2019 年 10 月在西安市林业局汉城湖苗圃开始实施。供试园林废弃物为自行收集的街道修剪枝条及枯枝落叶,并粉碎至 1~3 mm 粒径粉末;供试番茄品种为“毛粉 802”,购自西安世佳种业有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 园林废弃物生物质炭制备 将园林废弃物颗粒装入瓷坩埚后加盖密封,于马弗炉内进行灼

烧。采用程序升温法进行炭化,以 10 ℃/min 的升温速率升到 200 ℃,保温 2 h,进行预炭化;采用相同的升温速率分别将热解温度升高至 300、500、700 ℃,保温 3 h 热解炭化;待自然冷却至 50 ℃ 时,出料研磨,过 100 目筛并取样测定理化性状,每个处理 3 次重复。待取样完成后,将各处理 3 次重复样品充分混匀后装袋封存备用,分别标记为 T300、T500、T700。

1.2.2 试验设计 2020 年 3 月,选取大小一致、籽粒饱满种子,采用 0.1% 高锰酸钾溶液浸种消毒;选用 72 孔穴盘育苗,基质按 $V_{\text{椰糠}}:V_{\text{草炭}}:V_{\text{蛭石}}:V_{\text{珍珠岩}}=2:1:1:1$ 比例配制。2020 年 4 月温室定植,土壤容重为 1.41 g/cm³,有机质、全氮、全磷及全钾含量分别为 6.52、0.77、0.41、10.85 g/kg;试验共设 4 个处理,即整地前分别施入 1 100 kg/hm² 不同温度制备的园林废弃物生物质炭(T300、T500、T700),以不施入生物质炭为对照(CK);小区面积为 6.3 m × 1.5 m = 9.45 m²,株行距为 30 cm × 50 cm,每个处理重复 3 次,随机区组排列,各小区间用苯板隔离,田间管理措施保持完全一致。

1.2.3 测定指标及方法 生物质炭产率采用俞花美等方法^[14]进行测定并计算;生物质炭 C、H、O、N 及 P 元素含量采用元素分析仪(Vario MICRO,德国)进行测定;生物质炭比表面积、总孔体积、微孔体积、微孔率及平均孔径采用静态氮吸附仪(JW-BK224)测定。分别于番茄定植后 90、110、130、150 d 对各小区进行测产,计算平均单果质量和平均单株产量;选取各处理第 2 穗成熟果实(定植后 110 d)进行营养品质测定。分别采用钼蓝比色法、蒽酮比色法、便携式数显糖度计、高效液相色谱(high performance liquid chromatography,简称 HPLC)法和酸碱滴定法测定维生素 C、可溶性糖、可溶性固形物、番茄红素和可滴定酸含量,计算糖酸比:糖酸比 = 可溶性糖含量(%) / 可滴定酸含量(%)。

1.3 数据处理及统计分析

采用 Excel 2013 进行数据整理及作图,采用 SPSS 16.0 软件进行数据统计分析,用 Duncan's 氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同制备温度对园林废弃物生物质炭理化性质的影响

2.1.1 不同制备温度对园林废弃物生物质炭产率

及化学元素组成的影响 由表 1 可知,随着热解温度的升高,园林废弃物生物质炭产率逐渐降低,生物质炭的 C、N、P 元素含量逐渐升高,而 H、O 元素含量逐渐降低。与 300 ℃ 制备温度相比,700 ℃ 制备温度的生物质炭产率降低 25. 92%, C、N、P 元素含量分别提升 50. 56%、25. 37%、48. 39%, H 和 O 元素含量分别降低 72. 82%、84. 25%, 均达到显著差异水平。与 500 ℃ 制备温度相比,700 ℃ 制备温度的园林废弃物生物质炭产率显著降低 19. 82%, C、N、P 含量分别提升 9. 59%、6. 33%、10. 84%, 而 H 和 O 元素含量则分别降低 56. 76%、51. 19%, 且 C、N 元素含量 500 ℃ 和 700 ℃ 制备温度下差异不显著。综合考虑产率和化学元素含量,以 500 ℃ 为园林废弃物生物质炭最佳制备温度。

表 1 不同制备温度对园林废弃物生物质炭产碳率及化学元素组成的影响

处理	产率 (%)	元素组成 (%)				
		C	H	N	O	P
CK		47. 26b	5. 45a	0. 55c	41. 73a	0. 045d
T300	25. 39a	57. 06b	4. 71b	0. 67bc	28. 69b	0. 062c
T500	23. 46a	78. 39a	2. 96c	0. 79ab	9. 26c	0. 083b
T700	18. 81b	85. 91a	1. 28d	0. 84a	4. 52d	0. 092a

注:同列数据后不同小写字母表示在 0. 05 水平上差异显著,下表同。

2.1.2 不同制备温度对园林废弃物生物质炭比表面积及孔径结构的影响

由表 2 可知,随着热解温度的升高,园林废弃物生物质炭的比表面积、总孔体积、微孔孔容、微孔率及平均孔径均呈先上升后下降的趋势,其大小顺序为 T500 > T700 > T300。与 700 ℃ 制备温度相比,500 ℃ 制备的生物质炭比表面积、总孔体积、微孔孔容、微孔率及平均孔径分别显著提升 33. 83%、38. 78%、131. 82%、45. 73%、23. 91%。这说明 500 ℃ 制备的园林废弃物生物质炭具有最佳的孔隙结构。

表 2 不同制备温度对园林废弃物生物质炭比表面积及孔径结构的影响

处理	比表面积 (m ² /g)	总孔体积 (cm ³ /g)	微孔孔容 (cm ³ /g)	微孔率 (%)	平均孔径 (nm)
T300	14. 36c	0. 25c	0. 14c	20. 73c	5. 38c
T500	25. 79a	0. 68a	0. 51a	69. 35a	9. 69a
T700	19. 27b	0. 49b	0. 22b	47. 69b	7. 82b

2.2 不同制备温度生物质炭对连作番茄产量的影响

由图 1 可知,随着热解温度的升高,连作番茄单果质量和单株产量均呈现出先升高后降低的趋势,其高低顺序依次为 T500 > T700 > T300 > CK。与 CK 相比,T300、T500、T700 处理的连作番茄平均单果质量分别提升 15. 29%、36. 86%、27. 70%,单株产量分别提升 15. 65%、43. 13%、29. 01%。这说明 500 ℃ 制备的园林废弃物生物质炭对连作番茄单果质量和产量的提升幅度最高。

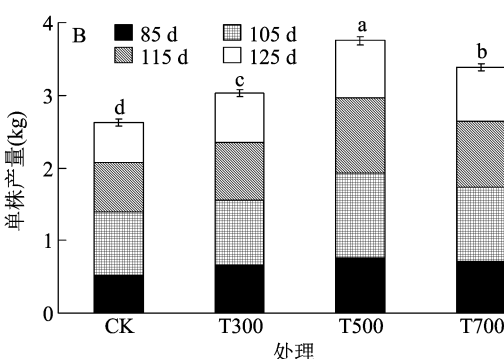
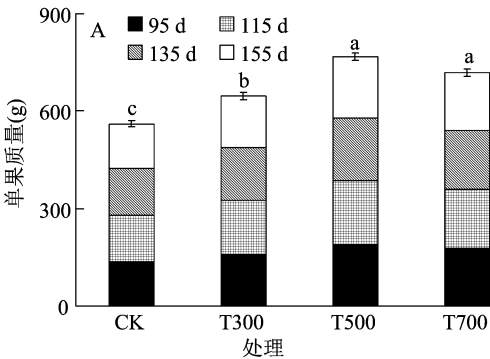


图1 不同制备温度生物质炭对连作番茄产量的影响

2.3 不同制备温度生物质炭对连作番茄品质的影响

由图 2 可知,外施园林废弃物生物质炭可明显提升连作番茄品质,且提升幅度随生物质炭制备温度升高呈现出先升高后降低的趋势,其品质优劣顺序依次为 T500 > T700 > T300 > CK。与 CK 相比,

T500 处理的连作番茄维生素 C、可溶性糖、可溶性固形物、番茄红素含量及糖酸比分别显著提升 51. 59%、35. 02%、27. 12%、37. 44%、64. 99%,可滴定酸含量显著降低 18. 18%。同时,T500 处理的连作番茄品质显著优于 T300 ($P < 0. 05$)。这说明 500 ℃ 制备的园林废弃物生物质炭对连作番茄品

质提升效果最佳。

2.4 不同制备温度生物质炭对连作番茄青枯病的影响

由图 3 可知,外施园林废弃物生物质炭可显著降低连作番茄青枯病病情指数,提高防治效果;随着制备温度的升高,连作番茄青枯病病情指数表现为先降低后升高的趋势,而防治效果则呈先升高后降低的趋势。与 CK 相比,T300、T500、T700 处理的

连作番茄青枯病病情指数分别降低 40.23%、75.26%、60.02%,均达到显著差异水平。设 CK 防治效果为 0,T300、T500、T700 处理的连作番茄青枯病防治效果分别提升 46.29%、77.99%、62.85%。这说明外施园林废弃物生物质炭可显著提升连作番茄青枯病抗性,以制备温度为 500 ℃ 的生物质炭效果最佳。

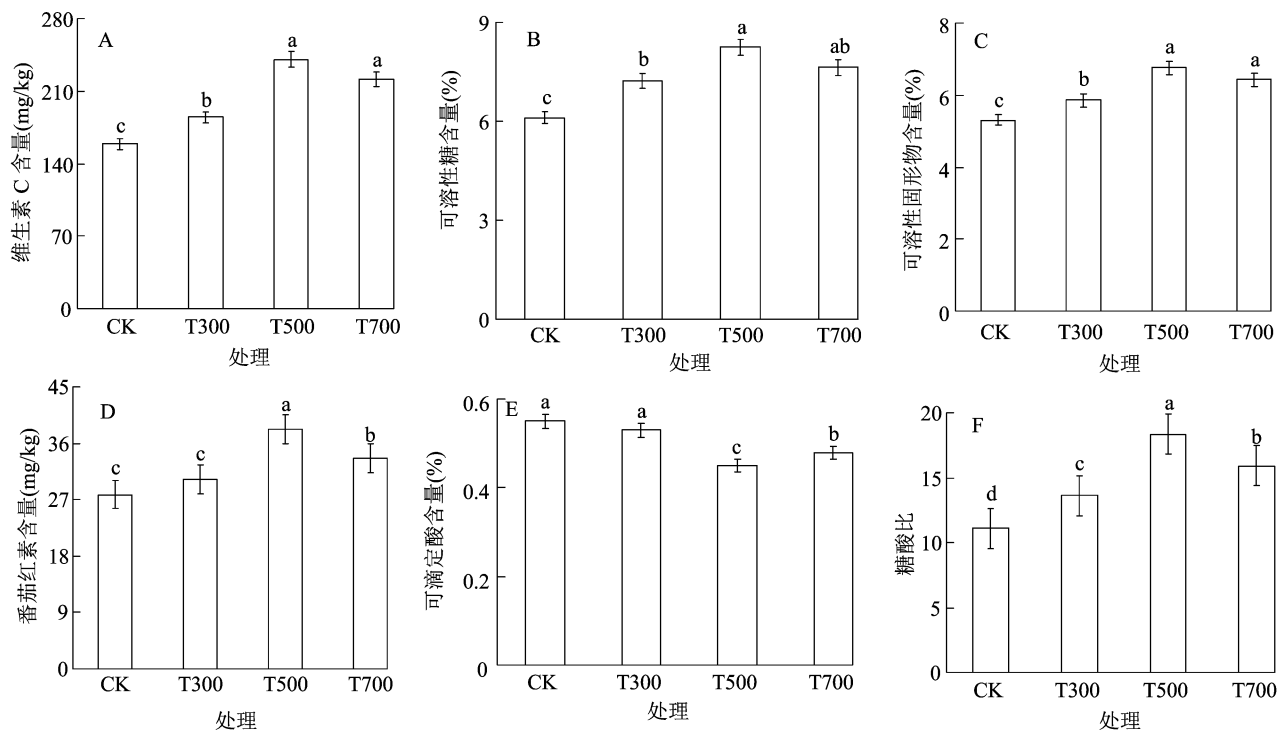


图2 不同制备温度生物质炭对连作番茄品质的影响

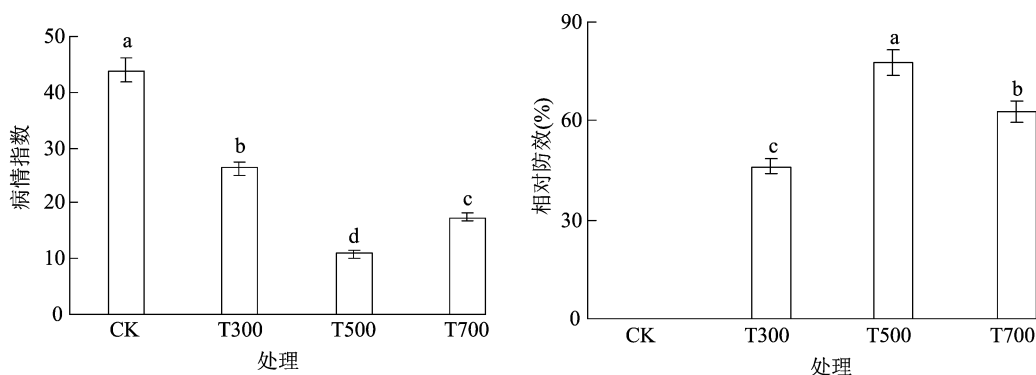


图3 不同制备温度生物质炭对连作番茄品质的影响

2.5 生物质炭理化指标与连作番茄产量、品质及青枯病的相关性分析

由表 3 可知,园林废弃物生物质炭的 C 元素含量与连作番茄单果质量、单株产量、可溶性固形物含量、糖酸比及对青枯病防治效果呈显著正相关,而与可滴定酸含量和青枯病病情指数呈显著负相

关;N 元素含量与连作番茄单果质量、维生素 C 含量、可溶性固形物含量、青枯病防治效果呈显著正相关,而与可滴定酸含量和青枯病病情指数呈显著负相关;O 元素含量与单果质量、单株产量、维生素 C 含量、可溶性固形物含量、番茄红素含量、糖酸比及青枯病防治效果呈显著负相关,而与可滴定酸含

量及青枯病病情指数呈显著正相关;P 元素含量与单果质量、维生素 C 含量、可溶性固形物含量及青枯病防治效果呈显著正相关,而与可滴定酸含量及青枯病病情指数呈显著负相关;园林废弃物生物质炭比表面积、总孔体积、微孔孔容、微孔率及平均孔径与连作番茄产量、品质及青枯病的相关性均达到显著水平;同时,比表面积与番茄红素含量达到极显著正相关;总孔体积与单果质量、番茄红素含量、糖酸比及青枯病防治效果均达到极显著正相关,与

可滴定酸含量及青枯病病情指数呈极显著负相关;微孔率与单果质量、可溶性固形物含量、番茄红素含量、糖酸比、防治效果达到极显著正相关,与可滴定酸含量及病情指数呈极显著负相关;平均孔径与单果质量、单株产量、糖酸比及青枯病防治效果达到极显著正相关,与可滴定酸含量及病情指数呈极显著负相关。这说明园林废弃物生物质炭理化性质与连作番茄产量、品质及青枯病抗性密切相关。

表 3 生物质炭理化指标与连作番茄产量、品质及青枯病的相关性分析

指标	相关系数									
	C 含量	H 含量	N 含量	O 含量	P 含量	比表面积	总孔体积	微孔孔容	微孔率	平均孔径
单果质量	0.571 *	-0.383	0.547 *	-0.612 *	0.543 *	0.786 *	0.912 **	0.720 *	0.911 **	0.941 **
单株产量	0.501 *	-0.296	0.475	-0.548 *	0.470	0.798 *	0.797 *	0.755 *	0.868 *	0.902 **
维生素 C 含量	0.380	-0.456	0.606 *	-0.663 *	0.602 *	0.766 *	0.794 *	0.802 *	0.853 *	0.886 *
可溶性糖含量	0.426	-0.206	0.397	-0.477	0.392	0.799 *	0.783 *	0.780 *	0.884 *	0.881 *
可溶性固形物含量	0.618 *	-0.445	0.597 *	-0.655 *	0.593 *	0.870 *	0.825 *	0.786 *	0.906 **	0.896 *
番茄红素含量	0.451	-0.236	0.423	-0.501 *	0.418	0.925 **	0.929 **	0.825 *	0.914 **	0.887 *
可滴定酸含量	-0.606 *	0.428	-0.584 *	0.644 *	-0.580 *	-0.775 *	-0.907 **	-0.816 *	-0.925 **	-0.908 **
糖酸比	0.500 *	-0.494	0.473	-0.546 *	0.468	0.798 *	0.916 **	0.883 *	0.928 **	0.916 **
病情指数	-0.563 *	0.373	-0.539 *	0.605 *	-0.535 *	-0.788 *	-0.935 **	-0.824 *	-0.933 **	-0.923 **
防治效果	0.531 *	-0.332	0.505 *	-0.575 *	0.501 *	0.794 *	0.928 **	0.835 *	0.924 **	0.918 **

注:“ ** ”“ * ”分别表示在 0.01、0.05 水平上显著相关。

3 讨论与结论

生物质炭热裂解主要包括脱水、裂解、炭化等反应过程,是一个极为复杂的热化学过程,其产率、化学元素组成及结构特性与原材料、热解温度和热解时间等密切相关^[14]。本研究发现,随着制备温度的升高,园林废弃物生物质炭产率逐渐降低,C、N、P 元素含量逐渐升高,H、O 元素含量则逐渐降低。本结果与林肖庆等研究结果^[15-16]一致,这可能是由于随着热解温度增高,原材料脱水及脱羧反应增强,导致 H 和 O 元素丢失量逐渐增大,进而致使 H 和 O 元素含量逐渐降低,C、N、P 元素含量升高,产炭率逐渐降低。生物质炭的孔隙结构主要由 2 个部分组成:一方面是生物质本身即存在的海绵结构;另一方面是由木质素热解时因挥发分析出而产生的气泡与气孔^[17]。大量研究表明,随着制备温度的升高,生物质炭比表面积逐渐增大,孔隙结构逐渐变优。本研究发现,随着制备温度的升高,园林废弃物生物质炭比表面积、总孔体积、微孔孔容、微孔率及平均孔径均呈现先上升后下降的趋势,最佳制备

温度为 500 ℃,本结果与杨兴等研究结果^[12,17]一致,这可能是由于原材料不同所致,园林废弃物生物质炭原材料来源广泛,包括树枝、树叶、植物残体、落花落果等,热解温度过高可能会引起木质素软化熔融,造成气孔堵塞,进而导致生物质炭比表面积降低、孔隙结构变差。

生物质炭对植物生长和作物产量及品质提升具有明显的促进作用^[18-19]。本研究与牛亚茹等研究结果^[20]一致,其原因可能包括:首先,生物质炭具有丰富的孔隙结构,可促进土壤团聚体形成,改善土壤理化性状,增强保水保肥能力,提高土壤通气性和养分含量,从而促进植株生长^[20];其次,生物质炭丰富的孔隙结构可以为土壤微生物提供附着位点和生存空间,从而提高土壤酶活性,促进养分转化利用^[21];第三,生物质炭对植物光合作用具有一定的促进作用,从而提高作物产量和品质^[22]。同时本研究还发现,园林废弃物生物质炭的促生效果随热解温度升高而呈现先升高后降低趋势,最佳制备温度为 500 ℃,这可能是由于过高的热解温度可能会引起木质素软化熔融,造成气孔堵塞和孔隙结构

变差,从而对园林废弃物生物质炭的促生效果造成影响。牛亚茹等研究表明,外施生物质炭可增加大棚黄瓜根结线虫卵块数^[20];王成己等研究发现,生物质炭对烟草青枯病具有一定的防控作用^[23];王光飞等发现,生物质炭介导生防微生物对辣椒疫霉病具有一定的抑制作用^[24];张猛等研究表明,稻壳生物质炭搭载特基拉芽孢杆菌对西瓜枯萎病具有一定的防治效果,以制备温度 500 ℃ 效果最佳^[8]。本研究发现,园林废弃物生物质炭可显著提高番茄青枯病防治效果,且防治效果随着制备温度的升高呈现先升高后降低趋势,以 500 ℃ 效果最佳。本结果与前人研究结果较为一致,其原因主要包括:首先,生物质炭可促进植株生长健壮,提高抗病性;其次,生物质炭丰富的孔隙结构有助于改善土壤微生物区系,维持微生物菌群平衡,促进有益菌增长、抑制病原菌数量增长;第三,500 ℃ 制备的生物质炭防控效果优于 700 ℃ 生物质炭可能是由于热解温度过高引起木质素软化熔融,导致生物质炭孔隙结构变差,进而造成防控效果弱于 500 ℃ 生物质炭。

相关性分析结果表明,园林废弃物生物质炭理化性质与连作番茄产量、品质及青枯病抗性密切相关。其中,单果质量、糖酸比及防治效果与总孔体积、微孔率及平均孔径呈极显著正相关,可滴定酸含量及病情指数与总孔体积、微孔率及平均孔径呈极显著负相关,单株产量与平均孔径呈极显著正相关,可溶性固形物含量与微孔率呈极显著正相关,番茄红素含量则与比表面积、总孔体积及微孔率呈极显著正相关。

参考文献:

- [1] 刘 瑜,赵佳颖,周晚来,等. 城市园林废弃物资源化利用研究进展[J]. 环境科学与技术,2020,43(4):32-38.
- [2] 陈浩天,张地方,张宝莉,等. 园林废弃物不同处理方式的环境影响及其产物还田效应[J]. 农业工程学报,2018,34(21):239-244.
- [3] 魏 乐,李素艳,李 燕,等. 园林废弃物堆肥替代泥炭用于天竺葵和金盏菊栽培[J]. 浙江农林大学学报,2016,33(5):849-854.
- [4] 谢祖彬,刘 琦. 生物质炭的固碳减排与合理施用[J]. 农业环境科学学报,2020,39(4):901-907.
- [5] 任 美,唐翔宇,耿春女,等. 生物质炭对坡耕地紫色土中抗生素吸附-解吸及迁移的影响[J]. 土壤,2020,52(5):978-986.
- [6] 包骏瑶,赵颖志,严淑娟,等. 不同农林废弃物生物质炭对雷竹林酸化土壤的改良效果[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(1):43-50.
- [7] 姬 强,马媛媛,刘永刚,等. 秸秆生物质炭对土壤结构与活性碳分布、转化酶动力学参数及小麦生长的影响[J]. 生态学报,2019,39(12):4366-4375.
- [8] 张 猛,王 琼,冯发运,等. 稻壳生物质炭搭载特基拉芽孢杆菌防治西瓜枯萎病[J]. 江苏农业学报,2019,35(6):1308-1315.
- [9] 刘欢欢,董宇禹,柴 升,等. 生态炭肥防控小麦根腐病效果及对土壤健康修复机理分析[J]. 植物保护学报,2015,42(4):504-509.
- [10] Alexis M A, Rasse D P, Rumpel C, et al. Fire impact on C and N losses and charcoal production in a scrub oak ecosystem [J]. Biogeochemistry, 2007, 82(2):201-216.
- [11] 高秀红,刘子明,滕洪辉,等. 热解温度对花生壳生物质炭吸附去除水中 4-硝基酚的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(7):224-230.
- [12] 杨 兴,黄化刚,王 玲,等. 烟秆生物质炭热解温度优化及理化性质分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2016,42(2):245-255.
- [13] 田 雪,周文君,郑卫国,等. 不同碳化时间对园林废弃物生物质炭氮磷吸附解吸研究[J]. 林业与环境科学,2020,36(5):41-47.
- [14] 俞花美,陈 森,邓 惠,等. 蔗渣基生物质炭的制备、表征及吸附性能[J]. 热带作物学报,2014,35(3):595-602.
- [15] 林肖庆,吕豪豪,刘玉学,等. 生物质原料及炭化温度对生物炭产率与性质的影响[J]. 浙江农业学报,2016,28(7):1216-1223.
- [16] 赵伟宁,杨 兴,何丽芝,等. 热解温度对典型南方木本园林废弃物生物质炭理化特性的影响[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(6):1007-1016.
- [17] Sharma R K, Wooten J B, Baliga V L, et al. Characterization of chars from pyrolysis of lignin[J]. Fuel, 2004, 83(11/12):1469-1482.
- [18] 赵世翔,姬 强,李忠徽,等. 热解温度对生物质炭性质及其在土壤中矿化的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(6):183-192,200.
- [19] 沈 奕,赏莹莹. 复合酵素和生物质炭配施对番茄生长发育和产量、品质的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):133-135.
- [20] 牛亚茹,付祥峰,邱良祝,等. 施用生物质炭对大棚土壤特性、黄瓜品质和根结线虫病的影响[J]. 土壤,2017,49(1):57-62.
- [21] 刘耀臣,王 萍,刘润进,等. 丛枝菌根真菌和生物质炭对连作西瓜土壤肥力的影响[J]. 微生物学通报,2020,47(11):3811-3821.
- [22] 刘 宁,彭春菊,雷赵枫,等. 氮沉降和生物质炭对毛竹叶片光合特性的影响[J]. 浙江农林大学学报,2019,36(4):704-712.
- [23] 王成己,郭学清,曾文龙,等. 生物质炭对烟草青枯病的防控作用及应用前景分析[J]. 南方农业学报,2019,50(8):1756-1763.
- [24] 王光飞,马 艳,郭德杰,等. 生物质炭介导生防微生物抑制辣椒疫霉的作用[J]. 中国生态农业学报(中英文),2019,27(7):1015-1023.