李亮亮,吴正超,陈　彬,等. 生物炭对化感物质胁迫下番茄幼苗生物量及保护酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(16):99 – 103.
doi:10.15889/j.issn.1002 – 1302.2017.16.025

生物炭对化感物质胁迫下番茄幼苗生物量及保护酶活性的影响

李亮亮, 吴正超, 陈　彬, 刘文娥, 臧　健
(沈阳农业大学,辽宁沈阳 110866)

摘要:研究化感物质对番茄幼苗生长的抑制作用及加入生物炭缓解化感物质对番茄幼苗的毒害作用,并从生物量、光合作用指标、保护酶活性及丙二醛(MDA)含量的变化进行讨论。结果表明,化感物质对番茄幼苗的生物量、光合作用及叶绿素含量具有显著的抑制作用,幼苗体内 SOD、POD、CAT 的活性降低,番茄幼苗体内的 MDA 含量显著增加;加入不同来源的生物炭,番茄幼苗的生物量、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、净光合速率、气孔导度及叶绿素含量有显著提高,化感物质对保护酶活性的抑制作用得到缓解,番茄幼苗体内 MDA 含量有所降低,番茄幼苗的生长得到改善;炭化秸秆与炭化稻壳的作用效果相近,与炭化稻壳、炭化秸秆相比,炭化污泥缓解化感物质毒害作用的效果相对较差。因此,添加生物炭可用于预防番茄连作障碍的发生。

关键词:番茄;化感物质;生物炭;光合作用;保护酶活性
中图分类号: S641.201　　**文献标志码:** A　　**文章编号:**1002 – 1302(2017)16 – 0099 – 05

连作障碍是影响番茄产量的重要因素之一,而引起番茄连作障碍的原因很多,化感物质的毒害作用是其中之一[1-4]。防止化感物质对蔬菜产生毒害的方法有多种多样,包括客土法、土壤中添加生物制剂或改良剂、土壤淋洗等,其中,土壤中添加有机质被认为是一种方便可行的方法[5-7]。但是,有机质降解性较强、降解后可能产生其他不确定因素而使其应用受到一定的限制。生物炭是生物质在缺氧条件下热降解的产物,对除草剂、农药等有机物具有较强的吸附能力[8-10]。因此,添加不易降解、吸附性好、来源广泛的生物炭可能会成为一个新的发展方向,而研究生物炭缓解或消除化感物质对番茄幼苗的毒害作用,对指导番茄抗连作障碍栽培具有一定的现实意义。

有研究表明,邻苯二甲酸、鞣酸、香草酸、苯甲酸、水杨酸、阿魏酸及肉桂酸等化感物质能够对蔬菜作物产生毒害作用[11-12],可以引起植株生物量、保护酶、根系三羧酸(TCA)循环酶活性降低,根系呼吸速率、线粒体功能受到抑制,土壤酶活性被改变[13-14]。生物炭具有巨大的比表面积微孔结构,有很强的吸附能力,能吸附土壤污染物、降低污染物对土壤环境的危害,目前活性炭、活性木炭等已在美国、日本等国家蔬菜种植中广泛应用,并取得较好的效果[15-16]。有研究发现,活性碳可在水培条件下吸附植物根系分泌物,降低水杨酸、苯甲酸、对羟基苯乙酸等化感物质及丙二醛(MDA)的含量,增加植株生长量[17]。本试验通过在发生化感物质毒害的土壤中添加不同来源的生物炭,研究生物炭对番茄幼苗生物量参数、光合作用、叶绿素含量及对根系、叶片保护酶活性的影响,探讨番茄幼苗缓解化感物质伤害的途径,为有效防治番茄连作障碍提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

1.1.1　番茄壮苗的培育　试验于 2014 年 5 月在沈阳农业大学试验基地塑料大棚进行,供试番茄品种为辽园多丽。将挑选好的番茄种子播于穴盘中,培养至 4 叶 1 心时,将优良壮苗移栽到盛有不同土壤处理的 10 cm × 10 cm 塑料钵内。土壤为棕壤土,碱解氮、有效钾、速效磷的含量分别为 50.15、68.25、52.25 mg/g,有机质含量为 11.2 g/kg,pH 值为 6.8。

1.1.2　化感物质的配制　分别配制 10 mmol/L 邻苯二甲酸、鞣酸、香草酸、苯甲酸的 0.2% 乙醇水溶液,等体积混合。将配制好的化感物质分别施入各营养钵中,每 5 d 施入 1 次,每次 60 mL。

1.1.3　生物炭的制备　分别选用秸秆、稻壳、污泥作为生物质原料,风干;置于烘箱烘干,粉碎,过 10 目筛;取一定量烘干的生物质,表面包裹铝箔纸,置于去掉内衬的高压消解罐内在马弗炉中 500 ℃热解 3 h。

1.2　试验设计

试验共设 5 个土壤处理,分别为 CK:土壤 +0.2% 乙醇水溶液;A:土壤 + 化感物质;B:土壤 + 化感物质 + 炭化秸秆(2% 全碳含量);C:土壤 + 化感物质 + 炭化稻壳(2% 全碳含量);D:土壤 + 化感物质 + 炭化污泥(2% 全碳含量)。每处理定植 10 株,重复 3 次,随机排列。每 3 d 浇 1 次 Hoagland 营养液,每次 50 mL。其他栽培管理与生产相同。

1.3　测定内容及方法

1.3.1　生长指标及叶绿素含量测定　开始处理后 10 d,采用

收稿日期:2017 – 02 – 04
基金项目:辽宁省自然科学基金(编号:201202192)。
作者简介:李亮亮(1971—),男,北京人,博士,副教授,从事设施园艺及农业环境生态研究。E – mail:LLL204600@163.com。
通信作者:臧　健,硕士,讲师,从事农业资源与土壤生态环境研究。E – mail:zangjian – 12@163.com。

称质量法测定幼苗根、叶片、地上部鲜质量,采用钢卷尺测定根长;按 Arnon 的方法[18]测定叶绿素含量;

1.3.2　光合作用参数测定　处理后 20 d,使用 Li-6400 型便携式光合作用仪测定番茄幼苗第 6 张功能叶的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间隙 CO_2 浓度(C_i),控制条件为空气相对湿度 50% ~70%、温度 30 ℃,采用开放式气路。

1.3.3　保护酶活性及丙二醛含量测定　分别取处理后 2、5、10、20 d 的根尖或去脉叶片样品 1.0 g,加入 5 mL 预冷的 50 mmol/L pH 值为 7.8 的磷酸缓冲液[含 0.2 mmol/L 乙二胺四乙酸(EDTA)、2% 聚乙烯吡咯烷酮(PVP)];研磨,匀浆 4 ℃ 4 000 r/min 离心 10 min;取上清液,参考李合生的方法[19]测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)的活性,酶活性分别以 U/g、U/(g·min)表示,按照 Aebi 等的方法[20]测定过氧化氢酶(CAT)活性,酶活性以 μmol/(mg·min)表示,采用硫代巴比妥酸法[21]测定 MDA 含量,单位为 μmol/g。

1.4　数据统计分析

采用 Excel 2010、SPSS 12.0 软件对数据进行统计,采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性分析。

2　结果与分析

2.1　化感物质对幼苗生长及叶绿素含量的影响及生物炭的缓解作用

由表 1 可见,不同处理对番茄幼苗生物量及叶绿素含量有显著影响;与对照相比,A 处理的番茄幼苗各生长指标及叶绿素含量均有显著降低,根鲜质量、地上部鲜质量、叶鲜质量、根长、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量分别为对照的 56.6%、66.3%、58.0%、62.0%、26.8%、43.7%,说明化感物质对番茄幼苗生长有显著的抑制作用,且导致叶绿素含量有显著降低($P<0.05$);B 处理与 C 处理相比,除地上部鲜质量、叶鲜质量差异显著($P<0.05$)外,其他指标相互间差异不显著($P>0.05$),说明炭化稻壳与炭化秸秆对化感物质土壤的处理效果较为相似;B 处理、C 处理各指标均显著小于对照值,说明生物炭能有效缓解化感物质对番茄的毒害作用;与 B 处理、C 处理相比,炭化污泥处理(D 处理)除叶绿素 b 含量差异不显著($P>0.05$)外,其他指标显著降低($P<0.05$),其中叶鲜质量只有 C 处理的 67.7%;与 A 处理相比,D 处理各生长指标及叶绿素含量均显著提高($P<0.05$),其中叶绿素 a 含量的差异相对最大,为 A 处理的 2.4 倍。

表 1　不同处理对番茄幼苗生长及叶绿素含量的影响

处理	鲜质量(g)			根长(cm)	叶绿素含量(mg/g)	
	根	地上部	叶		叶绿素 a	叶绿素 b
CK	11.26±0.43a	25.72±0.33a	15.73±0.36a	26.3±1.3a	1.23±0.13a	0.48±0.06a
A	6.37±0.34d	17.05±0.42d	9.12±0.42e	16.3±0.7d	0.33±0.09d	0.21±0.05c
B	9.59±0.65b	21.12±0.63b	12.67±0.52c	23.1±2.1b	0.95±0.11b	0.37±0.10b
C	9.73±0.72b	25.13±0.65a	14.95±0.29b	24.2±1.6b	0.96±0.12b	0.35±0.08b
D	7.65±0.46c	19.31±0.55c	10.12±0.31d	18.2±1.2c	0.80±0.10c	0.33±0.09b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。表 2 同。

2.2　化感物质对幼苗光合作用的影响及生物炭的缓解作用

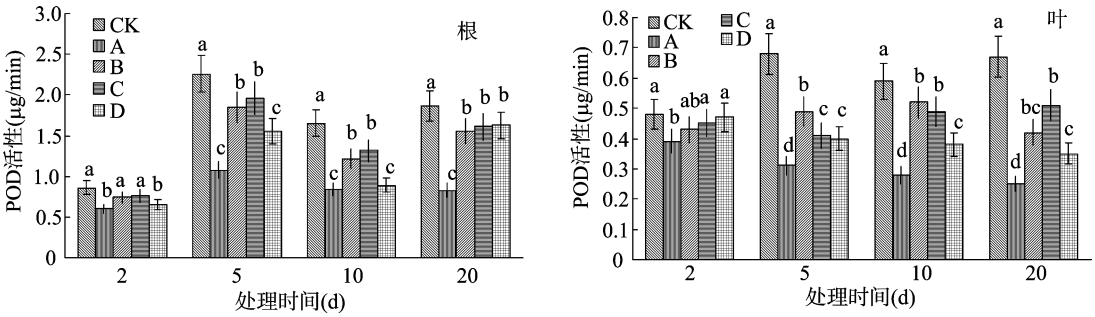
由表 2 可见,使用化感物质处理的番茄幼苗(处理 A),其叶片胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、净光合速率、气孔导度均有显著下降($P<0.05$),分别下降 27.3%、20.9%、24.1%、44.0%;分别加入炭化秸秆、炭化稻壳的番茄幼苗(处理 B、处理 C),其叶片胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、净光合速率、气孔导度相互间差异不显著($P>0.05$),但显著高于处理 A($P<0.05$),净光合速率、气孔导度显著低于 CK($P<0.05$),胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率与 CK 差异不显著($P>0.05$);加入炭化污泥的番茄幼苗(D 处理),其叶片胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、净光合速率、气孔导度显著高于 A 处理($P<0.05$),除气孔导度外其他光合指标均显著低于处理 B、处理 C($P<0.05$)。由此说明,化感物质对番茄幼苗的光合作用有一定影响,可通过生物炭物质进行缓解,不致使番茄在幼苗期就受到较重的损害,这与之前的研究结论[11]一致;不同来源的生物炭缓解化感作用的效果不同,炭化污泥虽有缓解作用,但效果差于炭化秸秆、炭化稻壳。

表 2　不同处理对番茄幼苗光合作用的影响

处理	胞间 CO_2 浓度(μmol/mol)	蒸腾速率[mmol/(m²·s)]	净光合速率[μmol/(m²·s)]	气孔导度[mmol/(m²·s)]
CK	337±16a	2.34±0.32a	6.92±0.23a	0.175±0.026a
A	245±21c	1.85±0.23c	5.25±0.14d	0.098±0.018c
B	329±19a	2.27±0.35a	6.64±0.38b	0.136±0.020b
C	319±25a	2.39±0.37a	6.73±0.24b	0.127±0.019b
D	286±23b	2.03±0.26b	6.03±0.27c	0.131±0.033b

2.3　化感物质对番茄幼苗叶和根保护酶活性、膜质过氧化的影响及生物炭的缓解作用

2.3.1　对 POD 活性的影响　由图 1 可见,试验处理后 2、5、10、20 d,处理 A 的根 POD 活性显著低于 CK、处理 B、处理 C,处理 B、处理 C 的根 POD 活性除处理后 2 d 外显著低于 CK,处理 B 与处理 C 的根 POD 活性相互间差异不显著;与处理 A 相比,处理 D 的根 POD 活性有所升高,除处理后 20 d 时与 A 处理差异显著外,其他时期均与 A 处理差异不显著;处理后 20 d 时,处理 D 的根 POD 活性与处理 B、处理 C 差异不显著,可能与采样或测定误差有关。各处理对叶片 POD 活性的作



柱形图中不同小写字母表示同一时间处理间差异显著($P<0.05$)。下图同

图1　不同处理对番茄幼苗 POD 活性的影响

用与根有着相似的趋势,处理 A 的叶片 POD 活性多显著低于其他处理;处理 B、处理 C、处理 D 均能有效缓解化感物质对叶片 POD 活性的影响,减缓叶片 POD 活性的下降;处理 D 的叶片 POD 活性显著高于处理 A。这说明番茄幼苗在受到化感物质刺激,会导致导致根、叶的 POD 活性下降,而添加不同来源的生物炭,可明显降低其变化幅度,不同程度缓解化感物质对番茄幼苗的刺激作用。

2.3.2　对 SOD 活性的影响　由图 2 可见,处理 A 的根 SOD 活性随生育进程逐渐降低,且显著低于 CK;添加不同来源的生物炭(处理 B、处理 C、处理 D)与处理 A 相比,均能明显提高根 SOD 的活性,但均显著低于 CK 处理;处理 B、处理 C 的根 SOD 活性相互间差异不显著;处理 D 的根 SOD 活性在处理后 10、20 d 时显著低于处理 B、处理 C。从整体看,各处理对叶片 SOD 活性的作用与根相似,化感物质对叶片的影响小于根;处理 A 的叶片 SOD 活性显著低于 CK,处理 B、处理 C 的叶片 SOD 活性与处理 A 相比多显著提高,且处理 B、处理 C 相互间差异不显著,在分别处理后 2、5 d 时与 CK 差异不显著;处理 D 的叶片 SOD 活性在处理后 20 d 显著低于处理 B、处理 C。

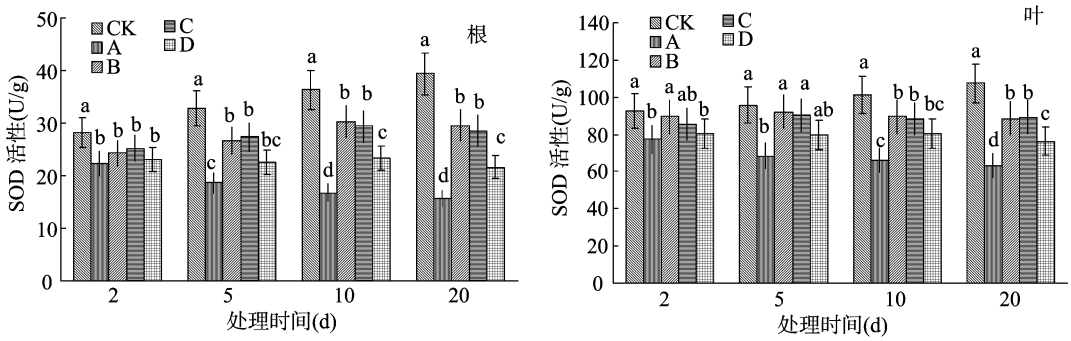


图2　不同处理对番茄幼苗 SOD 活性的影响

2.3.3　对 CAT 活性的影响　由图 3 可见,处理 A 的根、叶片 CAT 活性显著低于 CK,其中,处理 A 的根 CAT 活性随生育进程而逐渐降低,这与 SOD 活性规律相似;添加不同来源的生物炭均能明显提高番茄幼苗根、叶片的 CAT 活性,其中,处理 C 的效果相对最为显著,C 处理的根 CAT 活性是处理 A 的 1.6 ~2.1 倍,叶片 CAT 活性为 1.5 ~1.6 倍,尤其处理后 2 d 的根和处理后 2、5 d 的叶片,处理 C 与 CK 差异不显著;处理 B 缓解 CAT 活性的降低效果明显低于处理 C,其根、叶片 CAT 活性是 C 处理的 82.3% ~96.9%,而 D 处理的效果相对更差一些,只有 C 处理的 62.5% ~84.3%。

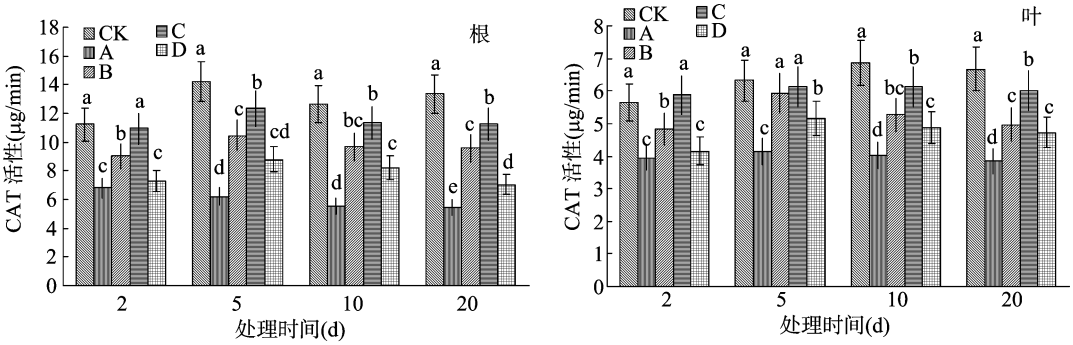


图3　不同处理对番茄幼苗 CAT 活性的影响

2.3.4　对膜质过氧化的影响　由图 4 可见,随番茄幼苗培养时间的延长,各处理番茄幼苗根、叶片中的 MDA 含量逐渐增加;处理 A 的根、叶片 MDA 含量显著高于 CK,是 CK 处理的 1.4 ~2.9 倍;添加不同来源的生物炭与处理 A 相比,可显著降低番茄幼苗根和叶片的 MDA 含量;处理 B 和处理 C 对番茄根、叶片 MDA 含量的影响多为不显著,仅处理后 10 d 时处理 C 的根 MDA 含量显著低于处理 B;加入炭化污泥(D 处理)虽然也能有效降低番茄幼苗根、叶片中的 MDA 含量,但与处理

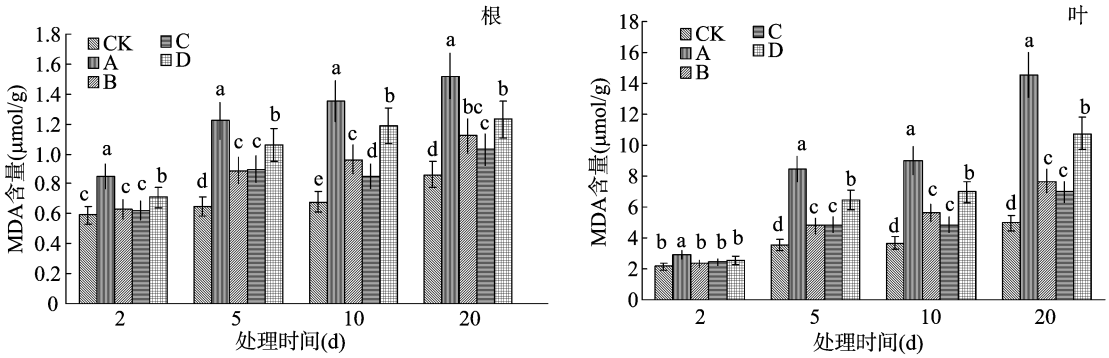


图4　不同处理对番茄幼苗 MDA 含量的影响

B、处理 C 相比,其缓解化感物质毒害的作用相对较差。

3　讨论

有研究表明,造成蔬菜连作障碍的原因主要有土传病虫害、土壤营养失衡、化感物质的毒害作用这 3 个方面,其中连作土壤中的化感物质是引起番茄连作障碍的一个重要因素[22-23]。番茄受到化感物质胁迫,其生物量、生长速率和物质含量都会发生变化,化感物质对植株的干物质积累、保护性酶、光合作用都有很大影响[24-25]。在逆境胁迫下,植物气孔受到限制,气孔阻力增加,光合机构功能受损,叶绿体结构受到破坏,叶绿素含量降低,造成光合作用受到影响[26-27]。活性氧水平和膜脂过氧化程度等与光合速率下降也有关。王艳芳等认为,加入对羟基苯甲酸会造成平邑甜茶幼苗叶片中的叶绿素含量和光合速率显著降低,电子传递速率(ETR)、光系统Ⅱ(PSⅡ)实际光化学效率($\Phi_{PSⅡ}$)和有效光化学效率(F_v'/F_m')下降,PSⅡ反应中心的光化学活性受到抑制,PSⅡ的电子传递效率降低[28]。植株在生长过程中,膜脂过氧化会对细胞膜造成伤害,因此,POD、SOD、CAT 等细胞酶会在体内会形成自我抵御体系,起到消除细胞内活性氧、维持活性氧动态平衡的作用,而化感物质会对 POD、SOD、CAT 酶活性产生一定的影响。MDA 是生物膜系统中一种脂质过氧化产物,MDA 含量高低表明脂质过氧化强度的高低及对膜系统的伤害程度。因此,化感物质可通过影响保护酶的活性而使得 MDA 含量提高[29-30]。本研究中,加入化感物质可引起番茄幼苗根鲜质量、地上部鲜质量、叶鲜质量、根长等生物量指标的降低,光合作用指标下降,叶绿素含量降低,番茄幼苗不同生长时间的根、叶片 POD、SOD、CAT 酶活性明显降低,自由基的过量积累不能受到有效抑制,自由基的产生与清除之间的平衡被打破,造成脂膜过氧化损伤,MDA 含量显著升高。

土壤中添加生物炭可有效地降低化感物质对植物生长的毒害作用[31-34]。有研究表明,添加生物炭的污染土壤,其可提取态的酚类及多环芳烃等有机污染物含量显著降低,可显著增加酸性土壤的阳离子交换量(CEC)[35-38]。本研究结果表明,添加不同来源的生物炭能够缓解化感物质带来的伤害作用,能够显著提高番茄幼苗的生物量、叶绿素含量及光合作用指标,明显提高番茄幼苗根、叶片中 POD、SOD、CAT 这 3 种保护酶的活性,显著降低根、叶片中的 MDA 含量,提高番茄幼苗的抗逆性;3 种不同来源的生物炭对化感物质毒害作用的缓解效果不同,炭化稻壳与炭化秸秆的作用相似,其中炭化稻壳的作用效果相对好一些,而炭化污泥的效果相对炭化稻壳与炭化秸秆而言更差。

目前,大多学者认为,生物炭能缓解化感物质毒害作用的原因在于生物炭可通过吸附或隔离作用而降低化感物质、残留农药及重金属离子等有害物质对植物的伤害[39-41,10];也有人认为,生物炭可以提高植株的赤霉素和生长素含量,两者能激活 SOD 活性,从而抑制超氧自由基及羟基自由基的产生,提高植物清除活性氧的能力,减少膜脂的过氧化作用,缓解化感物质对植株的破坏[42-45]。不同来源的生物炭之所以产生不同的效果,一是由于生产生物炭的生物质不同,所产生的生物碳结构可能会不同,因此吸附化感物质的能力也就有所不同,二是不同来源的生物炭夹带的其他物质不同,如重金属含量等,可能会导致生物炭对植物激素的刺激不同或造成干扰,这都有待进一步研究。

总之,化感物质抑制番茄幼苗的生长发育,降低其生物量和光合作用,影响番茄保护酶的活性,增加丙二醛含量,而加入生物炭能缓解番茄因自毒作用引起的生长障碍。但是,添加不同来源的生物炭其作用效果不同,添加碳化稻壳、碳化秸秆的效果相对更好,对土壤物理性质也有改善作用,且不会引入过多的其他有害物质。

参考文献:

[1]Asaduzzaman M, Asao T. Autotoxicity in beans and their allelochemicals[J]. Scientia Horticulturae,2012,134(2):26-31.

[2]张江红,彭福田,蒋晓梅,等. 外源自毒物质对桃实生苗生长的影响[J]. 山东农业科学,2015,47(8):78-82.

[3]赖金龙,陶宗娅,吴　国,等. 邻苯二甲酸二丁酯对蚕豆胚根细胞微核形成的影响及毒理机制[J]. 生态毒理学报,2014,9(1):107-113.

[4]Chen L C, Wang S L, Wang P, et al. Autoinhibition and soil allelochemical (cyclic dipeptide) levels in replanted Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations[J]. Plant and Soil,2014,374(1/2):793-801.

[5]Heděnec P, Novotný D, Usták S, et al. Allelopathic effect of new introduced biofuel crops on the soil biota: a comparative study[J]. European Journal of Soil Biology,2014,63(4):14-20.

[6]Xu G,Wei L L,Sun J N,et al. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: direct or indirect mechanism? [J]. Ecological Engineering,2013,52(2):119-124.

[7]韩光明,刘　东,孙世清,等. 生物炭对不同连作年限棉田棉花光合特性的影响[J]. 湖南农业科学,2015,54(24):6202-6206.

[8]张继义,王　龙,李金涛,等. 小麦秸秆生物碳质吸附剂对硝基苯的吸附性能[J]. 环境工程学报,2013,7(1):226 – 230.
[9]李玉梅,刘忠堂,王根林,等. 生物炭对土壤残留异噁草松的生物有害性影响研究[J]. 作物杂志,2013(3):111 – 115.
[10]颜　钰,王子莹,金　洁,等. 不同生物质来源和热解温度条件下制备的生物炭对菲的吸附行为[J]. 农 业环境科学学报,2014,33(9):1810 – 1816.
[11]李亮亮,李天来,张恩平,等. 碳化玉米芯缓解肉桂酸对番茄幼苗生长的抑制作用[J]. 华北农学报,2012,27(5):139 – 143.
[12]张国斌,郁继华,冯　致,等. NO 和 ABA 对自毒作用下辣椒幼苗光合作用的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(10):2076 – 2084.
[13]张兆波,毛志泉,朱树华. 6 种酚酸类物质对平邑甜茶幼苗根系线粒体及抗氧化酶活性的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(15):3177 – 3184.
[14]王青青,胡艳丽,周　慧,等. 根皮苷对平邑甜茶根系 TCA 循环酶的影响[J]. 中国农业科学,2012,45(15):3108 – 3114.
[15]Kumar S, Masto R E, Ram L C, et al. Biochar preparation from *Parthenium hysterophorus* and its potential use in soil application [J]. Ecological Engineering,2013,55:67 – 72.
[16]Harvey O M, Kuo L, Zimmerman A R, et al. An index – based approach to assessing recalcitrance and soil carbon sequestration potential of engineered black carbons (biochars) [J]. Environmental Science & Technology,2012,46(3):1415 – 1421.
[17]Wang H L, Lin K D, Hou Z A, et al. Sorption of the herbicide terbuthylazine in two New Zealand forest soils amended with biosolids and biochars[J]. Journal of Soils and Sediments,2010,10(2):283 – 289.
[18]Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. Plant Physiology,1949,24(1):1 – 15.
[19]李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:164 – 165.
[20]Aebi H. Catalase *in vitro*: methods enzyme [M]. Orlando, USA: Academic Press,1984:121 – 126.
[21]中国科学院上海植物生理研究所,上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社,1999:115 – 119.
[22]Meenu S, Urja P, Aarti T. Role of allelochemicals in plant growth promoting rhizobacteria for biocontrol of phytopathogens original research article[J]. Microbiological Research,2014,169(1):18 – 29.
[23]孙步蕾,王艳芳,张先富,等. 连作土壤中残根对平邑甜茶幼苗生物量及土壤酚酸类物质和微生物的影响[J]. 园艺学报,2015,42(1):131 – 139.
[24]陆晓民,杨摇威. 油菜素内酯对氯化钠胁迫下黄瓜幼苗的缓解效应[J]. 应用生态学报,2013,24(5):1409 – 1414.
[25]李俊芝,王功帅,胡艳丽,等. 几种低分子量有机酸对连作平邑甜茶幼苗光合与根系生长的影响[J]. 园艺学报,2014,41(12):2489 – 2496.
[26]孙永江,付艳东,杜远鹏,等. 不同温度/光照组合对“赤霞珠”葡萄叶片光系统Ⅱ功能的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(6):1191 – 1200.
[27]Zai X M, Zhu S N, Qin P, et al. Effect of glomus mosseae on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters, and chloroplast ultrastructure of beach plum (*Prunus maritima*) under NaCl stress[J]. Photosynthetica,2012,50(3):323 – 328.
[28]王艳芳,沈　向,陈学森,等. 生物炭对缓解对羟基苯甲酸伤害平邑甜茶幼苗的作用[J]. 中国农业科学,2014,47(5):968 – 976.
[29]Troncozo M I, Gómez R P, Arambarri A M, et al. Growth and oxidative enzymatic activity of *in – vitro* cultures of *Ciliochorella buxifolia*[J]. Mycoscience,2015,56(1):58 – 65.
[30]Zou J C, Liu X Y, Zhong C L, et al. Effect of palmitic acid on remediation of *Scripus triqueter* and enzymes activities of the rhizosphere soil in the simulated diesel – spiked wetland [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 94: 109 – 114.
[31]Yang Y N, Sheng G Y. Enhanced pesticide sorption by soils containing particulate matter from crop residue burns [J]. Environmental Science & Technology,2003,37(16):3635 – 3639.
[32]Prapagdee S, Piyatiratitivorakul S, Petsom A, et al. Application of biochar for enhancing cadmium and zinc phytostabilization in *Vigna radiata* L. cultivation[J]. Water Air and Soil Pollution,2014,225(12):1 – 13.
[33]Salem M, Kohler J, Rillig M C. Palatability of carbonized materials to Collembola[J]. Applied Soil Ecology,2013,64(1):63 – 69.
[34]Liu X Y, Ye Y X, Liu Y M, et al. Sustainable biochar effects for low carbon crop production: a 5 – crop season field experiment on a low fertility soil from central China [J]. Agricultural Systems, 2014, 129:22 – 29.
[35]Sun J N, He F H, Shao H B, et al. Effects of biochar application on *Suaeda salsa* growth and saline soil properties[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(8):630 – 636.
[36]Zhang H H, Lin K, Wang H L, et al. Effect of *Pinus radiata* derived biochars on soil sorption and desorption of phenanthrene [J]. Environmental Pollution,2010,158(9):2821 – 2825.
[37]王　宁,侯艳伟,彭静静,等. 生物炭吸附有机污染物的研究进展[J]. 环境化学,2012,31(3):287 – 295.
[38]Lu S G, Sun F F, Zong Y T. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (vertisol) [J]. Catena,2014,114(2):37 – 44.
[39]Paranavithana1 G N, Kawamoto1 K, Inoue1 Y. Adsorption of Cd^{2+} and Pb^{2+} onto coconut shell biochar and biochar – mixed soil[J]. Environ Earth Science,2016,75(6):484 – 496.
[40]Butnan S, Deenik J L, Toomsan B Y, et al. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy[J]. Geoderma,2015,237 – 238:105 – 116.
[41]Peake L R, Reid B J, Tang X Y. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils[J]. Geoderma,2014,235 – 236:182 – 190.
[42]曾富华,罗泽民. 赤霉素对杂交水稻生育后期剑叶中活性氧清除剂的影响[J]. 作物学报,1994,20(3):347 – 351.
[43]Rosa J M L, Paneque M, Hilber I, et al. Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar and biochar – amended agricultural soil from Southern Spain[J]. Journal Soils Sediments, 2016, 16(2):557 – 565.
[44]刘丽珠,范如芹,卢　信,等. 农业废弃物生物质炭在设施栽培中应用的研究进展[J]. 江苏农业学报,2016,32(6):1434 – 1440.
[45]Adnan A, Karin H, Gerhard S, et al. Erratum to: potential of *Fusarium* wilt – inducing chlamydospores, *in vitro* behaviour in root exudates and physiology of tomato in biochar and compost amended soil[J]. Plant and Soil,2016,406(1/2):441 – 448.