

生物炭介导下磷水平对连作苹果幼苗及土壤环境的影响

王艳芳^{1,2}, 王珂¹, 徐少卓¹, 相立¹, 王鹏³, 陈学森¹, 毛志泉¹

(1. 山东农业大学园艺科学与工程学院, 作物生物学国家重点实验室, 山东 泰安 271018;

2. 山东农业大学化学与材料科学学院, 山东 泰安 271018; 3. 泰安市河道管理局 山东 泰安 271000)

摘要: 苹果连作障碍是制约苹果产业可持续发展的重要因素之一。研究生物炭介导下不同施磷水平对连作条件下平邑甜茶幼苗生物量、根系呼吸速率和土壤环境的影响, 探讨生物炭配施磷肥这种措施对苹果连作障碍的防控效果, 并筛选出合适磷肥用量, 为生产中老果园改造提供理论依据。盆栽条件下, 以苹果常用砧木—平邑甜茶为试材, 设计了连作土壤(CK)、连作土用溴甲烷熏蒸处理(F)、连作土+2%生物炭(B)、连作土+2%生物炭+0.5‰磷肥(BP0.5)、连作土+2%生物炭+1‰磷肥(BP1)和连作土+2%生物炭+2‰磷肥(BP2)6个处理。采用常规方法测定了不同处理对平邑甜茶幼苗生物量、根系呼吸速率、土壤养分和土壤酶活性的影响。结果表明: 溴甲烷灭菌后, 幼苗的株高、地径、鲜重和干重均远远高于连作土, 分别是连作土中幼苗的1.6, 1.5, 2.9, 2.5倍, 幼苗的根系呼吸速率及保护酶也远远高于对照和其他处理。生物炭、或者生物炭配施磷肥, 均可提高平邑甜茶幼苗的生物量, 幼苗的株高、地径、鲜重和干重分别是连作土中幼苗的1.2, 1.1, 1.6, 1.4倍和1.4, 1.2, 2.2, 1.9倍, 2种处理的根系呼吸速率也有大幅度提高; 生物炭配施0.5‰磷肥可明显提高幼苗根系SOD、POD和CAT酶活性, 同时降低MDA含量; 与对照相比, 生物炭配施0.5‰磷肥能明显提高土壤中有机质含量, 增加硝态氮和速效磷的含量, 促进土壤中脲酶、蔗糖酶和磷酸酶的活性。综合分析比较, 生物炭配施0.5‰磷肥相比于单施生物炭, 能更好的提高连作条件下平邑甜茶幼苗的生长发育, 增加土壤有机质含量, 增强土壤酶活性。因此, 生物炭配施磷肥这一综合措施能更好的防控苹果连作障碍。

关键词: 苹果连作障碍; 生物炭; 磷; 土壤酶; 土壤养分

中图分类号: S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0232-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.036

Effects of Phosphorus Level Mediated by Biochar on The Apple Seedlings and Soil Environment Under Continues Cropping

WANG Yanfang^{1,2}, WANG Ke¹, XU Shaozhuo¹, XIANG Li¹,

WANG Peng³, CHEN Xuesen¹, MAO Zhiquan¹

(1. State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018; 2. College of Chemistry and Material Science, Shandong

Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018; 3. Tai'an River Management Bureau, Tai'an, Shandong 271000)

Abstract: Apple replant disease (ARD) is a major factor that restricted the sustainable development of apple industry. In this study, the apple plant seedling biomass, root respiration rates, soil enzyme activities and soil environments under different phosphorus levels in continues cropping soil were determined to reveal the effect of biochar combined with phosphorus fertilizer on the control of ARD and select suitable amount of phosphate fertilizer, so as to provide theoretical basis for the renewal of old orchard and the prevention and control of ARD. Pot experiments including six treatments, which were the control (CK), methyl bromide sterilization (F), 2% biochar (B), 2% biochar + 0.5‰ phosphate fertilizer (BP0.5), 2% biochar + 1‰ phosphate fertilizer (BP1) and 2% biochar + 2‰ phosphate fertilizer (BP2), were carried out. The biomass and root respiration rate of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings, soil nutrient and soil enzyme activity were measured by

收稿日期: 2017-09-04

资助项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-27); 山东省高校科技计划项目(J15LF06); 山东省重点研发计划项目(2016GNC111009)

第一作者: 王艳芳(1979—), 女, 副教授, 主要从事苹果土壤环境调控研究。E-mail: wyanfang@126.com

通信作者: 毛志泉(1963—), 男, 教授, 主要从事苹果连作障碍防控技术研究。E-mail: mzhiquan@sdau.edu.cn

王艳芳(1979—), 女, 副教授, 主要从事苹果土壤环境调控研究。E-mail: wyanfang@126.com

conventional methods. The results showed that methyl bromide sterilization treatment increased heights, ground diameters as well as fresh and dry weights of seedlings, which were 1.6, 1.5, 2.9 and 2.5 times of the seedlings in the control, respectively. The root respiratory rates and activities of protective enzymes in the F treatment were all higher than those in the control or other treatments. The treatments of B and BP0.5 both significantly enhanced heights, ground diameters, fresh and dry weights of seedlings, which were 1.2, 1.1, 1.6, 1.4 and 1.4, 1.2, 2.2 and 1.9 times of the seedlings in the control, respectively. The root respiration rates increased significantly in the treatments of B and BP 0.5. Biochar combined with 0.5‰ phosphate fertilizer improved the activities of SOD, POD and CAT, and decreased the content of MDA in the seedling roots. Compared with the control, biochar combined with 0.5‰ phosphate fertilizer significantly improved the content of organic matter in soil, increased the contents of nitrate nitrogen and available phosphorus, and promoted the activities of urease, sucrase and phosphatase in soil. In conclusion, compared to the single application of biochar, application biochar combined with phosphate fertilizer could improve the development of *M. hupehensis* seedlings under continues cropping, increase soil organic matter content, enhance soil enzyme activity. Therefore, the integrated measures of biochar and phosphate fertilizer can better prevent and control ARD.

Keywords: apple replant disease; biochar; phosphorus; soil enzymes; soil nutrient

苹果是我国主要栽培果树之一,栽培面积及总产量均居世界第一^[1]。近年来,随着苹果产业的发展,老果园更新改造受土地资源限制,连作栽培在所难免。连作障碍会导致树势生长变弱、病虫害加剧、产量降低、品质下降等现象^[2]。目前,苹果连作障碍在世界各苹果主产区普遍发生,已成为各苹果优势产区一个普遍存在、亟需解决的生产问题。越来越多研究认为土壤微生物群落结构的改变,尤其是土壤有害真菌的大量繁殖,是引起苹果连作障碍的主要原因^[2-5]。目前生产上克服连作障碍行之有效的方法主要有土壤熏蒸和轮作^[5-7]。但土壤熏蒸污染环境且对人体有害,已被禁止使用,轮作耗时较长生产中不易推广。因此,寻求安全有效的缓解和克服苹果连作障碍的研究工作非常重要。

生物炭(Biochar)是生物物质在缺氧或低氧条件下热裂解的产物,在土壤理化改良、增加土壤肥力以及提高农作物产量等方面具有良好的效果^[8-9]。红壤性稻田土壤中施用凤眼莲生物炭在短期(1年)内有助于主要矿质元素的保蓄持留,可减控稻田面源 N、P 流失^[10],Wang 等^[11]研究发现单施生物炭能减少连作土壤中有害酚酸类物质的积累,提高连作条件下苹果幼苗的生物量及光合作用,对缓解连作障碍有一定的效果。有研究^[12-13]报道,连作土壤中添加磷肥,可缓解连作障碍。目前土壤中使用生物炭可促进作物生长发育的文章多有报道,但关于生物炭介导下施加磷肥以及施加磷肥的量,对改善苹果连作土壤环境、促进幼苗生长及缓解连作障碍的效果鲜有报道。因此,本试验以苹果连作土壤经溴甲烷熏蒸灭菌后作为高标准对照,以平邑甜茶为试材,盆栽条件下,研究生物炭配施磷肥种综合措施对连作条件下平邑甜茶幼苗生物量以及土壤环境的影

响,探索能替代溴甲烷的措施,以期为苹果连作障碍的防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 with 处理

试验于 2015 年 3—10 月在山东农业大学南校区国家苹果工程中心实验站进行。试验用土取自山东省泰安市岱岳区夏张镇王小庄村 25 a 生红富士苹果园,砧木为八棱海棠(*Malus micromalus*),连作土收集距树干 1 m、深 5—40 cm 的土壤,多点取样混匀使用。供试土壤为棕壤土,pH 6.20,速效钾、速效磷、硝态氮、铵态氮和有机质含量分别为 141.33,43.68,13.42,3.56 mg/kg 和 6.45 g/kg。生物炭采用炭化稻壳,购自安徽宣城家乐米业有限公司。磷肥(过磷酸钙, P_2O_5 ,12%)为市售产品。

平邑甜茶(*Malus hupehensis* Rehd.)种子于 4℃层积 30 d 左右,待种子露白后,于 2015 年 3 月 2 日播种于育苗基质中。本试验共设 6 个处理:连作土壤(CK)、连作土用溴甲烷熏蒸处理(F)、连作土+2%生物炭(B)、连作土+2%生物炭+0.5‰磷肥(BP0.5)、连作土+2%生物炭+1‰磷肥(BP1)和连作土+2%生物炭+2‰磷肥(BP2),生物炭和磷肥用量均为土壤质量比。待幼苗长至 6 片真叶时(5 月 2 日),选取长势一致、无病虫害的幼苗移栽到装有 7.0 kg 不同处理土壤的泥盆(直径 24 cm,高 18 cm)中,每个处理 7 盆,重复 3 次,共计 21 盆,每盆栽植 2 株幼苗,采用滴灌浇水,试验期内不再添加肥料。

1.2 试验方法

栽植幼苗生长 120 d 取样测定植株生物量及根系指标。同时取土壤样品,每处理样品随机取 5 盆,

等量混匀,分别制成 3 个平行样本,过筛取大约 500 g 土用于土壤养分和土壤酶活的测定。

用直尺和游标卡尺分别测定平邑甜茶幼苗的株高和地径,干鲜重使用电子天平进行测定。随机测定每个处理的 5 株幼苗,重复 3 次。根系呼吸速率采用 Oxy-Lab 氧电极自动测定系统进行测定,将 0.05 g 的幼苗根系切成大小均匀的小段(1.0 mm),放入氧电极(Hansatech Qxytherm System)反应杯中,加入 1.5 mL 的反应介质,启动磁转子后开始测定。3~5 min 后停止测定,根据记录曲线得到单位时间内氧的变化量,根据根的质量和反应介质体积计算出样品的呼吸速率^[14]。每处理重复 3 次。根系保护酶活性及丙二醛含量按赵世杰等^[14]的方法测定。土壤脲酶活性采用比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 的质量表示脲酶活性;磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法,以 1 g 土壤的酚毫克数表示磷酸酶活性;蔗糖酶活性测定采用比色法,以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的质量表示蔗糖酶活性^[15]。土壤理化性质按照土壤农业化学标准分析方法测定^[16],土壤有机质含量采用重铬酸钾—硫酸加热氧化法测定;土壤硝态氮和铵态氮含量采用 0.01 mol/L CaCl₂ 浸提,AA3 流动注射分析仪测定;土壤有效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提后,钼锑抗比色法测定;土壤速效钾含量采用 1 mol/L NH₄Ac(pH 7)浸提,火焰光度法测定。

1.3 统计分析

通过 SPSS 19.0 进行方差分析,采用 ANOVA 进行方差分析,不同处理间采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检测,处理平均数在 $P<0.05$ 水平的差异显著性。用 Excel 2003 完成对试验数据的制图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对平邑甜茶幼苗生物量的影响

由表 1 可以看出,连作土壤经过溴甲烷灭菌后,幼苗的株高、地径、鲜重和干重均远远高于连作土,分别是连作土中幼苗的 1.6,1.5,2.9,2.5 倍。连作土壤中添加生物炭也能明显提高幼苗的株高、地径、鲜重和干重,分别是对照的 1.2,1.1,1.6,1.4 倍。生物炭配施土壤质量 0.5‰和 1‰磷肥,明显增加幼苗生物量,效果好于单独施用生物炭,尤其是生物炭配施 0.5‰的磷肥,对生物量的促进效果仅次于溴甲烷熏蒸效果;2‰的磷肥对幼苗生物量的促进效果不明显。由此可见,生物炭配合适量的磷肥才能有效促进连作条件下平邑甜茶幼苗的生物量,缓解苹果连作障碍。

2.2 不同处理对平邑甜茶幼苗根系呼吸速率的影响

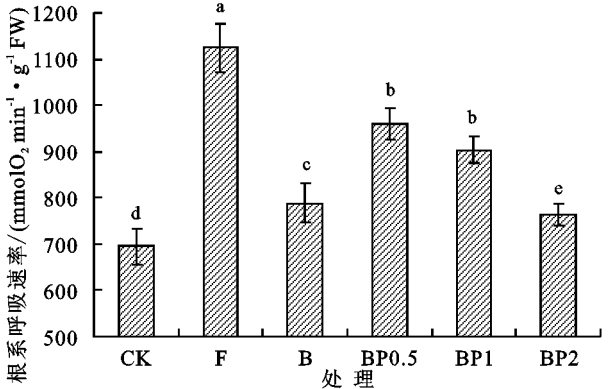
由图 1 可以看出,灭菌 F 处理后,根系呼吸速率

依然是最高的,为对照的 1.6 倍,而单施生物炭也可以提高幼苗根系呼吸速率,为对照的 1.1 倍,生物炭配施 0.5‰,1‰和 2‰的磷肥,幼苗根系呼吸速率分别为对照的 1.4,1.3,1.1 倍。这表明添加适量(0.5‰)磷肥可明显提高幼苗根系呼吸速率,添加过量磷肥效果反而不好。

表 1 生物炭介导下磷水平对平邑甜茶幼苗生长的影响

处理	株高/cm	地径/mm	鲜重/g	干重/g
CK	35.73±2.8d	5.06±0.4c	20.11±2.8e	9.63±1.4d
F	56.03±2.7a	7.64±0.6a	57.71±5.6a	23.87±1.9a
B	43.63±3.2c	5.56±0.5bc	33.15±3.6c	13.39±1.4c
BP0.5	51.20±2.2b	6.21±0.3b	44.30±3.6b	17.96±2.4b
BP1	44.50±2.4c	5.67±0.5bc	37.06±2.4c	12.43±1.5cd
BP2	37.20±1.2d	5.06±0.4c	26.08±3.8d	10.73±1.8cd

注:表中数据为平均值±标准误差;不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 生物炭介导下磷水平对平邑甜茶幼苗根系呼吸速率的影响

2.3 不同处理对幼苗根系保护酶活性和 MDA 含量的影响

由图 2 可以看出,不同处理对平邑甜茶幼苗根系 SOD 活性影响大小不一,其中以溴甲烷灭菌 F 处理 SOD 活性最高,为对照的 1.51 倍,其次为生物炭配施 0.5‰磷肥(BP0.5),BP1,B 和 BP2,分别为对照的 1.42,1.37,1.31,1.10 倍。CAT 活性变化与 SOD 变化趋势一致,均表现为溴甲烷灭菌使根系酶活性最高,BP0.5 处理效果仅次于 F 处理。POD 酶活性变化稍有不同,表现为 POD 酶活顺序为 $F>BP1>BP0.5>BP2>B>CK$ 与对照相比,溴甲烷灭菌、添加生物炭、施加 0.5‰、1‰和 2‰的磷肥均可显著降低根系 MDA 含量,分别为对照的 33.8%,65.5%,48.6%,50.7%,71.1%。

2.4 不同处理对土壤养分含量的影响

由表 2 可以看出,连作土壤经溴甲烷熏蒸后,土壤中的硝态氮、铵态氮和速效磷含量均有明显提高,有机质含量稍有增加未达显著差异,速效钾含量反而呈明显的降低趋势。

连作土壤中添加生物炭,有效增加土壤有机质含量,与对照相比,土壤中添加 2%(质量比)的生物炭后,有机质含量增加了 1.6 倍。生物炭的添加还能显著提高连作土壤中硝态氮和速效磷的含量,对速效钾和铵态氮含量影响不明显;在生物炭添加量相同的情况下,再

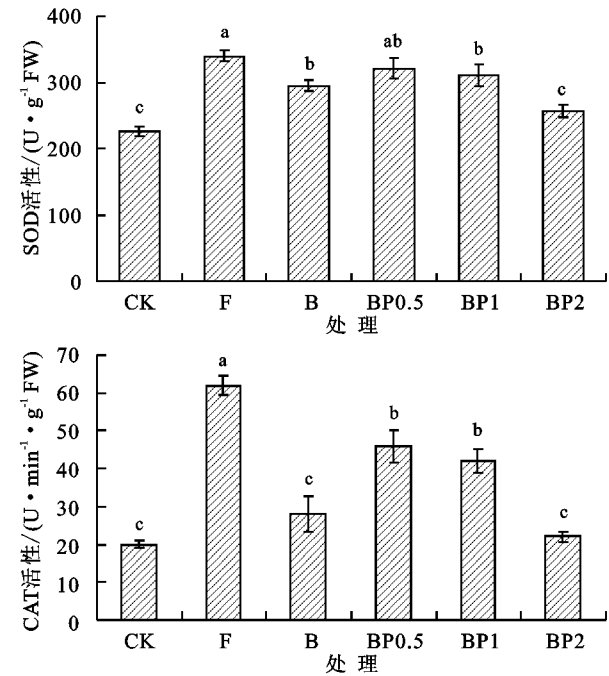


图 2 生物炭介导下磷水平对平邑甜茶幼苗根系保护酶活性和 MDA 的影响

表 2 不同处理对土壤有机质和速效养分的影响

处理	有机质/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
CK	12.61±1.6e	4.31±0.1d	3.74±0.1b	30.20±4.2e	68.10±4.2a
F	14.44±1.9e	5.58±1.6c	4.60±0.8a	95.51±13.2b	52.31±3.1b
B	32.71±1.4a	5.38±0.2c	4.28±0.2ab	42.63±3.6d	69.87±3.3a
BP0.5	27.07±1.3b	6.93±0.3ab	4.20±0.3ab	54.94±5.3c	69.26±2.6a
BP1	23.43±1.2c	5.86±0.2bc	3.65±0.6b	61.64±3.4c	69.31±2.7a
BP2	19.66±1.5d	7.96±0.2a	3.61±0.5b	110.57±7.9a	69.87±3.7a

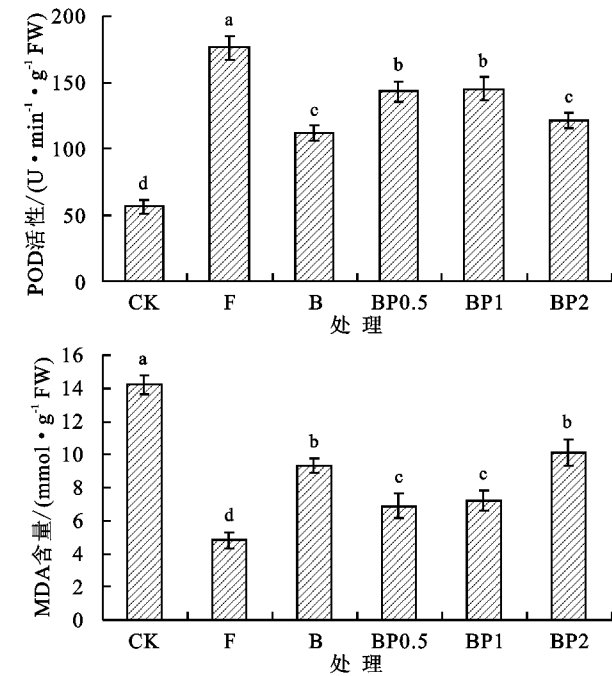
2.5 不同处理对土壤酶活性的影响

由图 3 可以看出,经过熏蒸灭菌后,土壤酶活性在我们测定的生长期与对照相比呈下降趋势。B、BP0.5 和 BP1 处理能显著提高脲酶活性,分别比对照提高了 30%,57%,35%,但当连作土壤中添加 2% 磷肥,脲酶活性反而降低了。磷酸酶活性变化规律与脲酶变化趋势一致。蔗糖酶活性变化与脲酶、磷酸酶活性变化稍有不同,表现在添加生物炭、磷肥均能明显提高连作土壤中蔗糖酶活性,连作土壤中添加生物炭、生物炭配施 0.5‰、1‰和 2‰的磷肥后,土壤中蔗糖酶活性分别为对照的 1.2,1.8,1.7,1.2 倍。总体来看,生物炭配施 0.5‰的磷肥对土壤酶活性促进作用最为明显,而溴甲烷灭菌后土壤酶活性最低。

3 讨论

苹果连作障碍是全世界主要苹果产区普遍存在的问题。长期连作可以改变土壤的理化和生物特性,

添加 0.5‰、1‰和 2‰的磷肥后,土壤中有机质含量呈明显的降低趋势,分别为 27.07,23.43,19.66 g/kg,但远远高于连作对照土壤中有机质的含量;硝态氮和速效磷含量随着磷肥施加量的增多而增加,铵态氮和速效钾含量与磷的施加量没有明显的相关性。



同时也会进一步影响作物的生长及产量。土壤添加剂可以改善土壤结构及理化性状,进而影响土壤微生物群落结构,促进植物的生长发育,提高农作物的品质与产量,在发生连作障碍的果园土壤中加入有机物料、生物炭、秸秆以及芥菜籽粉等土壤添加剂,可调整土壤微生物数量及群落结构^[11,17-19],进而促进幼苗的生长发育。本研究中,苹果连作土壤经过溴甲烷灭菌,平邑甜茶幼苗的株高和干鲜重显著增加,这可能是由于溴甲烷熏蒸后,土壤中微生物被灭杀,减轻了微生物失衡引起的连作症状,同时土壤灭菌还可使得某些缓效养分得以释放,这点和前人研究^[20-21]结果一致,即土壤熏蒸是缓解消除连作障碍的有效措施,目前还没有找到与这种方式相媲美的更好措施,这也进一步证明病原微生物是引起苹果连作障碍的重要因素。因此,本研究中,将经过溴甲烷熏蒸灭菌处理的连作土壤作为高标对照,其余处理措施,一方面与未做任何处理的连作对照相比较,研究缓解连作障碍的效果,另一方面与溴甲烷灭菌处理相比,探讨该措施能否取代并赶超对环境有污染的灭菌处理。生物炭配合施用适量磷肥(以土壤质量的 0.5‰最佳)能有效促进连作条件下苹果幼苗的生物量。根系呼吸作用对根系吸收养分及植株的生长发育具有重要意义,在本研究中,生物炭配施 0.5‰磷肥处理的苹果幼苗根系呼吸速率仅次于溴甲烷熏蒸处理,远远高于对照。这可能是由于生物炭具

有特殊的结构,能提高土壤 pH、电导率、养分持留能力及保水能力等^[8],而磷肥作为一种植物必须的养分,可直接促进幼苗植株的生长发育。

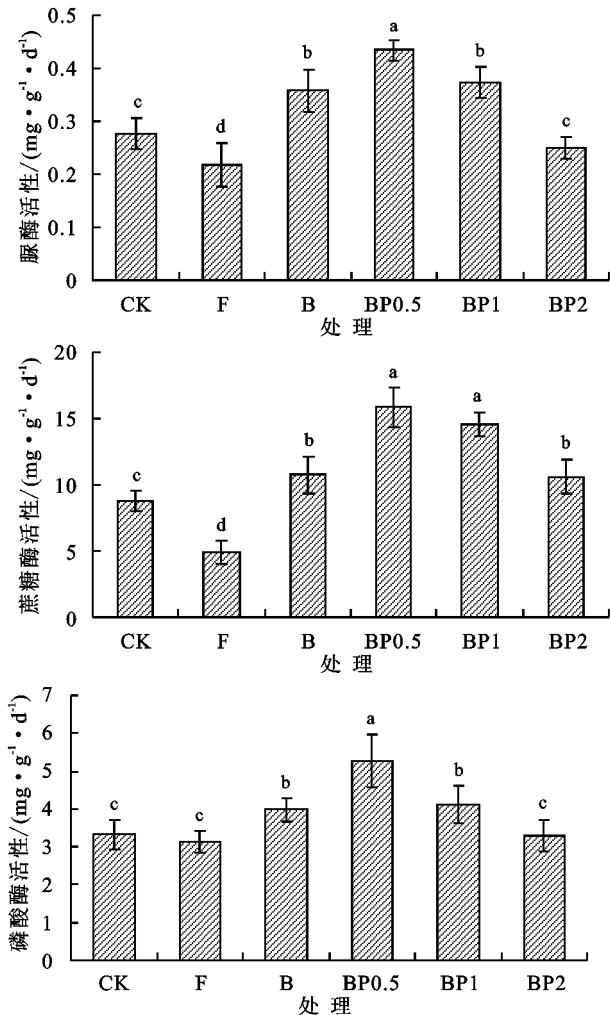


图 3 不同处理对土壤酶活性的影响

正常生长条件下植物细胞中活性氧的产生与清除保持着动态平衡。随着连作年限的增加,土壤环境不断恶化,土传病害加重,这将会导致抗氧化系统不能及时清除多余的活性氧,活性氧一旦积累到一定程度,活性氧产生速率将大于其降解速率,植物体内活性氧产生和清除的动态平衡被打破,对植物造成伤害。本研究中,连作土壤经过溴甲烷灭菌后,由于土壤中微生物区系发生变化,使病原微生物侵害根部机会减少,从而根系呼吸速率和根系保护酶活性都大大提高。在生物炭配施 0.5‰ 磷肥处理的连作土壤中生长的平邑甜茶幼苗根系 MDA 含量积累减少,同时显著提高幼苗根内 SOD、POD 和 CAT 等保护酶活性,说明生物炭配施 0.5‰ 磷肥对苹果连作障碍具有明显的缓解作用。这可能一方面是由于生物炭吸附了部分酚酸类化合物,降低了其有害浓度;另一方面可能是适量磷肥能促进作物生长发育,提高其抗逆性,吴洪生等^[22]将磷石膏专用复混肥施用在发生连作障碍的花生土壤里,可以有效

缓解红壤地区花生连作障碍。

土壤酶来自土壤微生物、植物和动物,是一种具有生物活性的催化剂,常被用作预测土壤肥力的指标^[23]。土壤酶活性与土壤肥力状况以及微生物活力密切相关,本研究中,连作土壤中加入生物炭和 0.5‰ 磷肥后,增加土壤有机质、硝态氮和速效磷含量,同时提高土壤脲酶、蔗糖酶和磷酸酶的活性,这可能是由于磷肥弥补了生物炭养分低的缺点,而生物炭则赋予有机肥养分缓释的功能,二者互补,协同作用,大幅度的改善了土壤质量,这个研究结果与刘建国等^[18]的研究结果相吻合。

4 结论

生物炭与适量磷肥(0.5‰~1‰,考虑成本因素,施用 0.5‰ 最好)配合施用可显著提高连作条件下平邑甜茶幼苗的生物量、根系呼吸速率和根系保护酶活性,增加土壤养分和土壤酶活性,改善连作土壤环境。因此,在老果园更新建立连作果园时,可考虑用生物炭与 0.5‰ 磷肥配合施用来替代溴甲烷熏蒸技术。

参考文献:

- [1] 里程辉,刘志,王宏,等. 我国苹果的产业现状分析及节本增效关键技术[J]. 北方园艺, 2016(3): 174-177.
- [2] Mazzola M, Manici L M. Apple replant disease: Role of microbial ecology in cause and control [J]. Annual Review of Phytopathology, 2012, 50(1): 45-65.
- [3] 谷岩,邱强,王振民,等. 连作大豆根际微生物群落结构及土壤酶活性[J]. 中国农业科学, 2012, 45(19): 3955-3964.
- [4] 乔蓬蕾,吴凤芝,周新刚. 连作对作物根际土壤微生物菌群及酶活性影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(5): 524-530.
- [5] Mazzola M. Elucidation of the microbial complex having a causal role in the development of apple replant disease in Washington [J]. Phytopathology, 1998, 88(9): 930-938.
- [6] 吕毅,宋富海,李园园,等. 轮作不同作物对苹果园连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生理指标的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(14): 2830-2839.
- [7] Wright P J, Falloon R E, Hedderley D. A long-term vegetable crop rotation study to determine effects on soil microbial communities and soilborne diseases of potato and onion [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2017, 45(1): 29-54.
- [8] 曹辉,李燕歌,周春然,等. 炭化苹果枝对苹果根区土壤细菌和真菌多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(17): 3413-3424.
- [9] Graber E R, Harel Y M, Kolton M, et al. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media [J]. Plant and Soil, 2010, 337: 481-496.
- [10] 陈灿,潘亚男,王欣,等. 凤眼莲生物炭对稻田土壤肥力

- 的影响[J]. 环境化学, 2017, 36 (4): 907-914.
- [11] Wang Y, Pan F, Wang G, et al. Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings under replant conditions [J]. Scientia Horticulturae, 2014, 175(1): 9-15.
- [12] Utkhede R S, Smith E M. Effects of nitrogen and phosphorus on the growth of microorganisms associated with apple replant disease and on apple seedlings grown in soil Infested with these microorganisms [J]. Journal of Phytopathology, 1991, 132(1): 1-11.
- [13] Sewell G, Preece D, Elsey R. Apple replant disease: the influence of soil phosphorus and other factors on the growth responses of apple seedlings to soil fumigation with chloropicrin [J]. Annals of applied biology, 1988, 113(3): 605-615.
- [14] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2002.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [17] Zhang Z, Chen Q, Yin C, et al. The effects of organic matter on the physiological features of *Malus hupehensis* seedlings and soil properties under replant conditions [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 146(3): 52-58.
- [18] 刘建国, 卞新民, 李彦斌, 等. 长期连作和秸秆还田对棉田土壤生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19 (5): 1027-1032.
- [19] Yim B, Hanschen F S, Wrede A, et al. Effects of biofumigation using *Brassica juncea* and *Raphanus sativus* in comparison to disinfection using Basamid on apple plant growth and soil microbial communities at three field sites with replant disease [J]. Plant and Soil, 2016, 406: 1-20.
- [20] Jensen P, Buszard D. The effects of chemical fumigants, nitrogen, plastic mulch and metalaxyl on the establishment of young apple trees in apple replant disease soil [J]. Canadian Journal of Plant Science Revue Canadienne de Phytotechnie, 1988, 68(1): 255-260.
- [21] 王素素, 杜国栋, 吕德国. 土壤高温处理对连作草莓根系呼吸代谢及植株发育的影响[J]. 果树学报, 2011, 28 (2): 234-239.
- [22] 吴洪生, 杨筱楠, 周晓冬, 等. 磷石膏专用复混肥缓解红壤花生连作障碍效果[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 1007-1013.
- [23] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1): 1-7.
- (上接第 231 页)
- [25] 章明奎, 周翠, 方利平. 蔬菜地土壤磷饱和度及其对磷释放和水质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (4): 544-548.
- [26] Bai Z B, Li H G, Yang X Y, et al. Erratum to: The critical soil P levels for crop yield, soil fertility and environmental safety in different soil types [J]. Plant and Soil, 2013, 372(1/2): 27-37.
- [27] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2275-2280.
- [28] 陈闻, 吴家森, 许开平, 等. 集约经营雷竹林土壤磷素状况及流失潜能[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(5): 687-693.
- [29] 李荣斌. 集约经营雷竹林氮磷流失防控技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 2-5.
- [30] Ramirez-ávila J J, Sotomayor-Ramirez D, Martínez-Rodríguez G A, et al. Phosphorus in runoff from two highly weathered soils of the tropics [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2): 267-277.
- [31] 胡慧蓉, 王海龙, Beecroft K, 等. 污水灌溉对林地土壤中磷的数量与形态影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 560-566.
- [32] 黄欣欣, 廖文华, 刘建玲, 等. 长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 779-789.
- [33] Mao X L, Xu X L, Lu K P, et al. Effect of 17 years of organic and inorganic fertilizer applications on soil phosphorus dynamics in a rice-wheat rotation cropping system in eastern China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15(9): 1889-1899.
- [34] 张涛, 李永夫, 姜培坤, 等. 雷竹林集约经营过程中土壤磷库的变化特征研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(7): 38-43.
- [35] 吕培, 李子川, 庄舜尧, 等. 集约经营雷竹林对土壤水溶性盐基组分含量的影响[J]. 浙江林业科技, 2016, 36 (2): 49-53.
- [36] Meason D F, Idol T W, Friday J B, et al. Effects of fertilisation on phosphorus pools in the volcanic soil of a managed tropical forest [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(10): 2199-2206.
- [37] Yan X, Wei Z Q, Hong Q Q, et al. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources [J]. Geoderma, 2017, 295: 80-85.
- [38] Mishima I, Hama M, Tabata Y, et al. Improvement of phosphorus removal by calcium addition in the iron electrocoagulation process [J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2017, 76(4): 920-927.