

李宗壕,达布希拉图. 炭醋材料对土壤磷素流失的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(19):226–231.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.19.041

炭醋材料对土壤磷素流失的影响

李宗壕, 达布希拉图

(云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650600)

摘要:为了明确生物炭和木醋液对土壤磷素流失的影响,提高土壤质量并为农业面源污染风险提供科学依据,以种植蔬菜的高原红壤为研究对象,进行室外白菜盆栽种植试验,设置单施水溶肥(W)、水溶肥配施木醋液(WP)、水溶肥配施生物炭(WB)、水溶肥配施生物炭和木醋液(WPB)4个处理。结果显示,炭醋材料能提高肥料利用率,减少磷素养分的流失;施用炭醋材料后,表层土壤速效磷含量提高,酸性磷酸酶活性增强,难溶性 Fe-P、Al-P 含量降低。与 W 处理相比,WP、WB、WPB 处理渗漏液中的总磷量分别降低了 22.78%、45.82%、49.45%;颗粒态磷量分别降低了 21.87%、47.28%、55.56%;WB、WPB 处理溶解态磷含量较 W 处理分别显著下降 29.39%、28.13%。

关键词:炭醋材料;渗漏液;磷素;白菜;盆栽试验;表层土壤

中图分类号: S153.6⁺1; S141.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)19-0226-06

磷是植物生长发育必需的营养元素,土壤中磷素的含量和利用率是决定土壤肥力和土壤质量的重要指标之一^[1]。高原红壤的土壤 pH 值一般较低,偏酸性,铁和铝会大量富集在土壤中,而磷与铁、铝结合形成 Fe-P、Al-P,使红壤中磷的有效性

降低^[2-3]。磷素虽然在土壤中累积,但植物难以吸收利用,植物的生长被限制,但通过淋洗和径流等方式磷素会进入水体,造成水体富营养化,导致农业面源污染问题,对生态环境和人类健康构成威胁^[4-5]。

炭醋材料是生物炭和木醋液以一定比例混合的混合物,通过施用炭醋材料能降低土壤养分的流失。国外相关研究将生物炭称为 biochar,通常指由木材、农作物废弃物、植物落叶等生物质或其他生物质废弃物在缺氧和温度低于 700 ℃ 条件下热解形成的产物^[6]。生物炭主要由芳香烃和单质碳或具有石墨结构的碳组成,一般含有 60% 以上的元素,

收稿日期:2021-03-07

基金项目:国家自然科学基金(编号:4196070320)。

作者简介:李宗壕(1996—),男,云南昆明人,硕士研究生,从事生物炭对高原红壤氮循环调控研究。E-mail: lzh960303@sina.com。

通信作者:达布希拉图,博士,副教授,主要从事生物炭对高原红壤氮循环调控研究。E-mail: 49024470@qq.com。

除草剂的复配制剂,以降低对水生生物的毒害作用。

参考文献:

- [1] Xu Y F, Feng R R, Wang L, et al. Computational and experimental investigations on the Interactions of aryloxy-phenoxo-propionate herbicides to estrogen receptor alpha in zebrafish[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 189: 110003.
- [2] 林涛, 曾兆华, 朱珍珍, 等. 10% 噁唑酰草胺乳油对 3 种水生生物的急性毒性和风险评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(4): 418–422.
- [3] 化学农药环境安全评价试验准则 第 12 部分: 鱼类急性毒性试验: GB/T 31270. 12—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [4] 化学农药环境安全评价试验准则 第 13 部分: 溞类急性活动抑制试验: GB/T 31270. 13—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [5] 周桂嫻, 陈天娇, 胡鲲. 4 种化学投入品对凡纳滨对虾的急性毒性[J]. 水产养殖, 2020, 41(1): 34–37.

- [6] 朱丽珍. 两种芳氧苯氧基丙酸酯类除草剂对斑马鱼毒性效应及作用机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [7] Yan Z Z, Yang Z H, Deng X L, et al. Novel aryloxyphenoxypionate derivatives containing benzofuran moiety: Design, synthesis, herbicidal activity, docking study and theoretical calculation[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2019, 154: 78–87.
- [8] Tehranchian P, Norsworthy J K, Korres N E, et al. Resistance to aryloxyphenoxypionate herbicides in Amazon sprangletop: Confirmation, control, and molecular basis of resistance[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2016, 133: 79–84.
- [9] Zhao F, Li H, Cao F J, et al. Short-term developmental toxicity and potential mechanisms of the herbicide metamifop to zebrafish (*Danio rerio*) embryos[J]. Chemosphere, 2019, 236: 124590.
- [10] Cheng B, Zou L F, Zhang H, et al. Effects of cyhalofop-butyl on the developmental toxicity and immunotoxicity in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Chemosphere, 2021, 263: 127849.
- [11] 徐德锋, 徐祥建, 王彬, 等. 高效除草剂噁唑酰草胺研究进展[J]. 农药, 2019, 58(6): 398–402, 406.

其他元素主要有 H、O、N、S 等^[7]。生物炭内部碳结构的组成形式可能与生物质细胞结构中碳的特征、炭化条件及炭化过程有关^[8]。生物炭在炭化以后,大多保留了原有生物质的良好孔隙结构,具有较大的孔隙度和比表面积^[9]。这些基本性质使生物炭具备了吸附力、抗氧化能力强等特性。高度的芳香化结构和疏水性的脂族碳使生物炭施入土壤以后,可以长时间保持稳定而不易在短时间内分解^[10-11]。

木醋液是农林废弃物(秸秆、树枝、木屑等)或养殖产生的废弃物(畜禽粪便等)作为生物质在一定温度下热解炭化产生的气体混合物,经冷凝回收分离得到的有机液体物质,是生物质炭化过程中产生的副产物^[12]。木醋液成分复杂,以酸类及酚类为主,还含有醛类、酮类、酯类、醇类、羧基类及呋喃类等 500 种成分^[13]。在农业生产上木醋液的应用十分广泛,可对土壤性状进行改良,提高土壤中土壤中的有效养分含量^[14];可促进植物的生长,促进植物果实的发育,提高果实的产量与品质^[15]。

针对农田白菜种植高肥投入、养分流失严重等问题,为从源头减轻水体污染因素,达到高产、优质、安全、环保的目的。本研究施用炭醋材料进行室外盆栽试验,以明确生物炭和木醋液对土壤磷素流失的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验地点在云南省昆明市晋宁区昆阳镇,属低纬高原亚热带季风气候,海拔 1 800 m,年平均气温 14.8 ℃,雨季集中在 6—10 月。冬无严寒,夏无酷暑,水资源较为丰富。

土壤样品取自云南省玉溪市通海县兴蒙乡,土壤基本理化性质如下:pH 值为 6.9,有机质含量为 43.79 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 96.00、96.23、94.63 mg/kg,阳离子交换量(CEC)为 10.6 cmol/kg。作物为结球白菜,品种为亚春高山娃娃菜,肥料为水溶肥 1 号[N:P₂O₅:K₂O(质量比)=12:15:9]、水溶肥 2 号[N:P₂O₅:K₂O(质量比)=18:5:13]、水溶肥 3 号[N:P₂O₅:K₂O(质量比)=7:4:25];生物炭原料为稻壳,热解温度为 500 ℃,pH 值为 8.1;木醋液为热解水稻时产生的蒸汽冷凝后静置 6 个月去掉上层焦油的褐色液体,pH 值为 3.4。木醋液主要成分相对含量为乙酸 34.62%、丙酸 1.69%、醛类 10.16%、酚类 21.95%、

酮类 7.90%。木醋液、水溶肥、稻壳生物炭均由云南威鑫农业科技股份有限公司提供。

1.2 试验设计

盆栽试验共设 4 个处理:单施水溶肥(W)、水溶肥配施木醋液(WP)、水溶肥配施生物炭(WB)、水溶肥配施炭醋材料(WPB),每个处理 4 次重复。施肥方式为水肥一体化滴灌施肥,根据当地农民惯用施肥量,施氮肥 5 g/盆(364.3 kg/hm²)、P₂O₅ 2.4 g/盆(174.8 kg/hm²)、K₂O 9.2 g/盆(670.3 kg/hm²),定苗后施肥 6 次,每 6 d 追肥 1 次,追氮比例依次为 10%、10%、20%、20%、20%、20%。第 1 次施 1 号肥,第 2~4 次施 2 号肥,第 5~6 次施 3 号肥。生物炭含量为 120 g/盆(8 914.3 kg/hm²),播种前施于表层土壤(0~10 cm);木醋液含量为 1.2 mL/盆(89.1 mL/hm²),配施于第 3、第 5、第 6 次追肥时,稀释 500 倍施用。16 盆盆栽,每盆定苗 3 棵,共计 48 棵白菜。于 2019 年 6 月 26 日播种,8 月 23 日收获。

1.3 渗漏液收集

试验用盆的直径为 52 cm,高 34 cm,每个盆底凿穿直径为 1 cm 的 9 个大小一致的洞口,底部重叠放置 1 个收集渗漏液的集水盆,集水盆底凿穿 1 个洞口,插上导管,导管将渗漏液引入收集桶。每个盆栽分别用独立的容器收集渗漏液。

1.4 指标测定及方法

1.4.1 土壤样品测定 在种植前,将混合土样风干,然后测定速效磷、难溶性的 Fe-P、Al-P,用 1 mol/L 的氯化铵浸提土壤后弃去上清液,再用 0.5 mol/L 的氟化铵浸提、离心,收集上清液,用钼锑抗法测定 Al-P 含量;浸提过 Al-P 的土样,用饱和氯化钠离心 2 次后,加入氢氧化钠溶液振荡,静置过夜后再振荡,离心,取上清液;加入浓硫酸 1.5 mL,摇匀放置过夜后过滤,用钼锑抗法测定 Fe-P 含量。

白菜收获时先用铲子沿着盆壁撬动土壤,使土壤与盆体分离,再将土壤与植株从盆中取出,置于牛皮纸之上,将植株与土壤进行分离,尽量避免植株根系折断。整株植株从土壤中取出后,轻轻抖掉附着在根系上的松散土壤(土体土),而将紧黏附在根系上的土壤(根际土)及整个根系装入事先装有 100 mL 0.2 mmol/L CaCl₂ 溶液的塑料杯中浸提 1 min,在浸提过程中将根系轻轻地浸入溶液并摇动,使尽可能多的根际土溶入浸提液中。

根际酸性磷酸酶活性的测定方法:根际土壤提

取液解冻后,在装有 0.5 mL 悬浊液的 2 mL 离心管中,加入 0.4 mL 醋酸钠缓冲液以及 0.1 mL 底物对硝基苯磷酸二钠(*p*NPP),在 25 ~ 30 ℃ 条件下暗培养 0.5 h 后,加入 0.5 mL 的 0.5 mol/L NaOH 终止反应;同时设置空白处理消除土壤腐殖质的影响,空白处理加入 0.4 mL 醋酸钠缓冲液,同样培养 0.5 h,加入 0.5 mL NaOH 终止反应,最后加入 0.1 mL *p*NPP 溶液,其他后续处理过程与样品相同。将土壤悬浊液在 6 000 *g* 条件下离心 1 min,按一定比例稀释后,在 405 nm 波长下测定吸光度。根据标准曲线确定土壤水解释放的对硝基酚含量。酸性磷酸酶活性表述为每小时每克根际土水解产生的对硝基酚的微克数,其中根际土质量以烘干土计。根际土酸性磷酸酶活性当天完成测定。

1.4.2 植株样品测定 烘干至恒质量后,测定全磷含量,计算每棵白菜的全磷吸收量。

1.4.3 水样测定 降雨、施肥后收集渗漏液并记录渗漏量。摇匀水样后每个盆栽取 250 mL 混合样,用于测定总磷、水溶性总磷、颗粒态磷浓度。用 0.45 μm 滤膜过滤后,用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定水溶性磷含量,颗粒态磷含量为总磷含量与水溶性磷含量之差。

1.5 数据统计与分析

利用 SAS、SPSS 软件进行单因素方差分析及相关性分析,用 Excel 2010 作图。

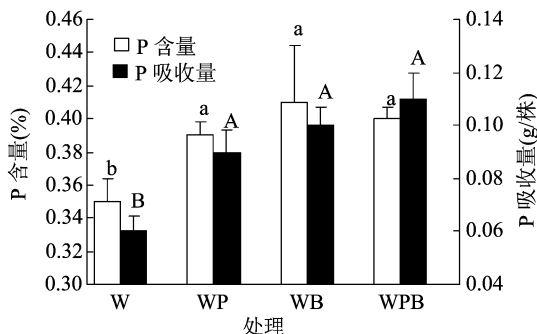
2 结果与分析

2.1 炭醋材料对白菜全磷含量和吸收量的影响

如图 1 所示,空心柱为盆栽白菜全磷含量,其中 WB 处理最高,但是与 WP、WPB 处理无显著差异。W 处理最低,与其他 3 个处理差异显著,WP、WB、WPB 处理比 W 处理分别提高 11.43%、17.14%、14.29%。黑色实心柱子为 1 棵白菜的全磷吸收量,不同处理对其影响效应表现为 WPB > WB > WP > W, W 处理显著低于其他 3 个处理,WP、WB、WPB 处理间无显著差异,但是 WB、WPB 均高于 WP。与 W 处理相比,WP、WB、WPB 处理的磷吸收量分别提高 50.00%、66.67%、83.33%。由此可知,无论是单独配施木醋液还是生物炭都能提高白菜对磷的吸收量,单独配施生物炭的施用效果有优于单独配施木醋液的趋势,两者混施的促进效果最佳。

2.2 炭醋材料对白菜土壤不同形态磷含量的影响

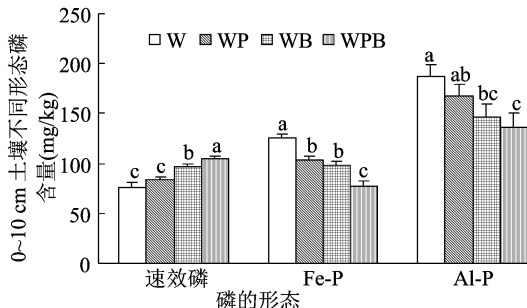
2.2.1 炭醋材料对表层土壤不同形态磷含量的影响



柱上不同小写字母表示不同处理间磷含量差异显著,不同大写字母表示磷吸收量差异显著($P < 0.05$)。图3同

图1 炭醋材料对盆栽白菜全磷含量和吸收量的影响

响 0 ~ 10 cm 深度土壤为白菜主要供给养分的土层,这一土层的速效磷能被白菜直接吸收利用,Fe-P、Al-P 为难溶性养分,难以被作物直接吸收利用。从图 2 可以看出,不同处理 0 ~ 10 cm 土层速效磷含量从大到小依次为 WPB > WB > WP > W, WP 与 W 处理无显著差异, WB 与 WP 处理差异显著。WPB 处理分别较 W、WP 处理增加 38.77%、25.27%, WB 处理分别较 W、WP 处理增加 28.12%、15.65%。由此说明,单独配施木醋液可增加表层土壤的速效磷的含量,生物炭和炭醋混施处理有增加表土土壤速效磷含量的作用,可以提高磷素供应能力。对于难溶性的 Fe-P、Al-P, W 处理最高, WP、WB 次之, WPB 最低。WPB、WP、WB 处理较 W 处理的 Fe-P 含量分别降低了 38.77%、21.98%、17.59%。WB 的 Fe-P 含量低于 WP 处理,但是无显著差异。WPB、WB 处理的 Al-P 含量低于 W 处理,分别降低了 27.01%、21.27%, WP 处理 Al-P 含量低于 W 但差异不显著。整体来看,施用生物炭、木醋液能提高表层土壤磷对白菜的供应能力,减少磷的固定,两者混施的作用最明显。

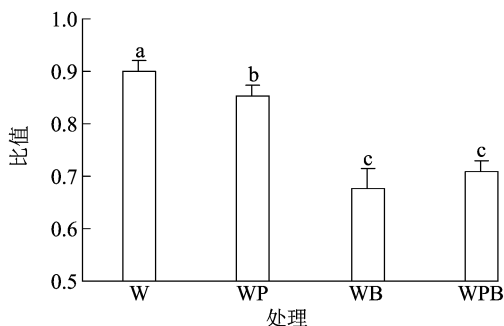


柱上不同小写字母表示不同处理间的相同形态的磷含量差异显著($P < 0.05$)

图2 炭醋材料对盆栽白菜土壤不同形态磷含量的影响

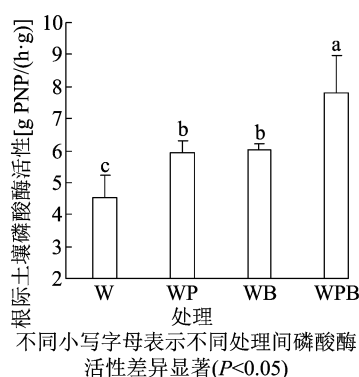
2.2.2 炭醋材料对不同土层土壤速效磷含量比值的影响 从图 3 可以看出,施用生物炭、木醋液后能

显著降低 20 ~ 30 cm 与 0 ~ 10 cm 土层速效磷含量比值, WP、WB、WPB 处理较 W 处理的比值分别降低了 5.17%、24.92%、21.21%。施用了生物炭的 2 个处理降低效果大于单施木醋液的处理。说明施用生物炭、木醋液能降低深层土壤与表层土壤速效磷含量的比值, 施用生物炭的作用大于施用木醋液。



比值表示 20~30 cm 土层与 0~10 cm 土层速效磷含量之比
图3 炭醋材料对 20~30 cm 与 0~10 cm 土层速效磷含量比值的影响

2.2.3 炭醋材料对白菜根际土壤磷酸酶活性的影响 从图 4 可以看出, 施用生物炭、木醋液后能明显提高白菜根际土磷酸酶活性, WPB、WP、WB 处理较



不同小写字母表示不同处理间磷酸酶活性差异显著 ($P < 0.05$)
图4 炭醋材料对盆栽根际土壤磷酸酶活性的影响

2.3.2 炭醋材料对渗漏液不同形态磷总量的影响 将 6 次渗漏液的不同形态磷总量汇总 (表 1), 发现不同处理对总磷和颗粒态磷含量表现出类似的影响规律, 均呈 $W > WP > WB > WPB$; WP、WB、WPB 处理的总磷含量较 W 处理分别降低了 18.55%、37.32%、40.28%; WP、WB、WPB 处理较 W 处理的颗粒态磷含量分别降低了 21.87%、47.28%、55.56%, 施用生物炭的 2 个处理 (WB、WPB) 显著低于单施木醋液的处理 (WP), 2 个施生物炭的处理间无显著差异, 但是 WPB 全磷和颗粒态磷含量均低于 WB。对于溶解态磷含量, WB、WPB 处理较 W 处理分别显著降低了 29.39%、28.13%; W 和 WP、WPB 和 WB 处理间无显著差异。说明单独配施木醋

W 处理分别提高了 72.12%、33.41%、31.19%。单独配施生物炭、木醋液无显著差异, 炭醋混施显著高于其他处理。

2.3 炭醋材料对白菜不同形态磷流失的影响

2.3.1 炭醋材料对渗漏液不同形态磷素浓度的影响 盆栽白菜生长周期通过自然降雨共计产生 6 次渗漏液, 将 6 次渗漏液中测得的不同形态磷素的浓度值绘制成高低图 (图 5)。可以看出, 整体上施用生物炭、木醋液能降低渗漏液不同形态磷素的浓度。对于溶解态磷含量, WB 的平均值最低, WPB 低于 WP, WP 水溶性磷的含量值更集中。对于颗粒态磷浓度, WP、WB、WPB 处理均低于 W 处理, 各处理平均值从大到小依次为 $W > WP > WB > WPB$ 。炭醋混施的降低效果更明显。对于总磷含量, 均值和颗粒态磷含量的变化规律一致, 各处理平均值和最低值从大到小依次为 $W > WP > WB > WPB$ 。说明施用生物炭、木醋液能降低盆栽渗漏液中不同形态磷素的浓度, 施用生物炭的作用效果优于木醋液, 两者混施的效果最佳。

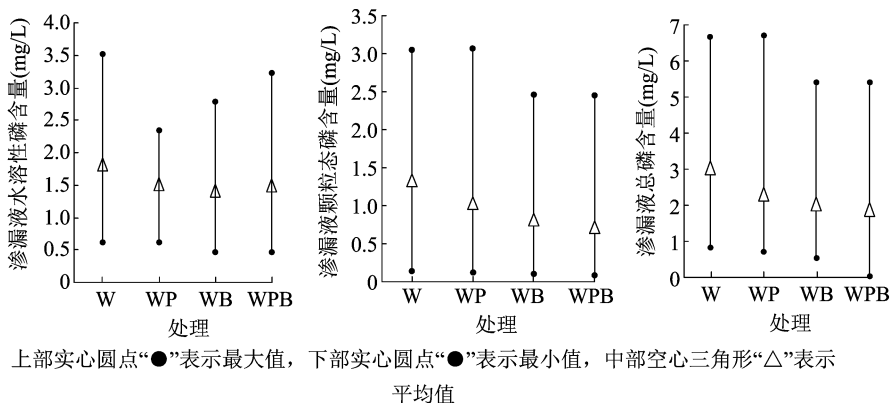


图5 炭醋材料对渗漏液不同形态磷素浓度的影响

液, 有降低渗漏液中水溶性全磷流失量的趋势, 施用生物炭能显著降低渗漏液中水溶性全磷流失量, 炭醋混施的效果与单独配施生物炭无显著差异。

从渗漏液溶解态磷、颗粒态磷含量占总磷含量比例的计算结果 (表 1) 可以看出, 溶解态磷含量的占比大于颗粒态磷含量, 说明通过渗漏流失的溶解态磷量多于颗粒态磷。不同处理对渗漏液溶解态磷含量的占比与颗粒态磷含量占比的影响大小相反, 溶解态磷含量占比从大到小依次为 $WPB > WB > WP > W$, 颗粒态磷含量占比从大到小依次为 $W > WP > WB > WPB$ 。施用了生物炭的 2 个处理溶解态磷含量的占比显著大于单施水溶肥处理, 单独配施木醋液的水溶磷的占比大于单施水溶肥处理。对于颗

表 1 炭醋材料对渗漏液不同形态磷素总量的影响

处理	总磷含量 (TP,mg/盆)	溶解态磷含量 (DP,mg/盆)	颗粒态磷含量 (PP,mg/盆)	DP/TP (%)	PP/TP (%)
W	124.84a	69.58a	55.24a	55.74b	44.25a
WP	101.68b	58.50ab	43.16b	57.53ab	42.45a
WB	78.25c	49.13b	29.12c	62.79a	37.21b
WPB	74.56c	50.01b	24.55c	67.07a	32.93b

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
粒态磷含量的占比,施了生物炭的 WB、WPB 处理显著低于未施生物炭的 W、WP 处理。

2.4 渗漏液磷素流失与植株、土壤的相关关系

将向环境中的磷流失-土壤-植株作为一个整体进行相关分析检验,如表 2 所示。0~10 cm 土壤 Fe-P、Al-P 含量与 0~10 cm 土壤速效磷含量呈极显著负相关,相关系数分别达 -0.838、-0.922;磷酸酶活性与 0~10 cm 土壤 Fe-P、Al-P 含量呈负相关,其中与 0~10 cm 土壤 Fe-P 含量呈极显著负相关;白菜对全磷的吸收量与渗漏液中颗粒态磷含量、水溶性磷总量、0~10 cm 土壤

Fe-P 含量、0~10 cm 土壤 Al-P 含量呈显著或极显著负相关,相关系数分别为 -0.621、-0.895、-0.909、-0.803,与 0~10 cm 土壤速效磷含量、根际土壤磷酸酶活性呈极显著或显著正相关,相关系数分别为 0.775、0.707。渗漏液中总磷含量与渗漏液颗粒态磷总量、水溶性磷总量、0~10 cm 土壤 Fe-P 含量、0~10 cm 土壤 Al-P 含量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.881、0.876、0.794、0.731,与 0~10 cm 土壤速效磷含量、植株 TP 吸收量呈显著或极显著负相关,相关系数分别为 -0.657、-0.861。

表 2 渗漏液磷流失与植株、土壤的相关关系

项目	相关系数							
	渗漏液中 PP 含量	渗漏液中 DP 含量	0~10 cm 土壤速效磷 含量	0~10 cm 土壤 Fe-P 含量	0~10 cm 土壤 Al-P 含量	20~30 cm 土壤速效磷 含量	磷酸酶 活性	植株 TP 吸收量
渗漏液中 DP 含量	0.544							
0~10 cm 土壤速效磷含量	-0.338	-0.822 **						
0~10 cm 土壤 Fe-P 含量	0.544	0.855 **	-0.838 **					
0~10 cm 土壤 Al-P 含量	0.393	0.896 **	-0.922 **	0.777 **				
20~30 cm 土壤速效磷含量	0.112	0.41	-0.647 *	-0.479	-0.348			
磷酸酶活性	-0.487	-0.476	0.537	-0.793 **	-0.467	0.261		
植株 TP 吸收量	-0.621 *	-0.895 **	0.775 **	-0.909 **	-0.803 **	0.221	0.707 *	
渗漏液中 TP 含量	0.881 **	0.876 **	-0.657 *	0.794 **	0.731 **	-0.167	-0.548	-0.861 **

注: *、** 分别表示显著相关($P<0.05$)、极显著相关($P<0.01$)。

3 讨论

炭醋材料可减轻养分流失,减少肥料施用量。因为炭醋材料比表面积大、多孔、官能团丰富等特殊的理化性质将养分吸附滞留在耕层土壤中,减少了养分向非耕层土壤的淋溶损失。由于炭醋材料的促生作用,生物量明显提高,白菜对磷的吸收量显著增加,进而减少了向环境中的流失。

对于磷的流失,渗漏液中总磷量与渗漏液颗粒态磷总量、水溶性磷总量、0~10 cm 土壤 Fe-P 含量、0~10 cm 土壤 Al-P 含量呈极显著正相关,与 0~10 cm 土壤速效磷含量、植株 TP 吸收量呈显著或极显著负相关。从渗漏液中水溶性磷、颗粒态磷

占总磷含量比例的计算结果看出,溶解态磷含量的比例大于颗粒态磷。说明通过渗漏流失的溶解态磷含量大于颗粒态磷。而渗漏液溶解态磷含量与 0~10 cm 土壤的速效磷、植株全磷吸收量呈极显著负相关,与表层土壤 Fe-P、Al-P 含量呈极显著正相关。施用炭醋材料提高了表层土壤的速效磷含量,白菜全磷吸收量增加了 83.33%,降低了表层土壤 Fe-P、Al-P 含量,从而使渗漏的水溶性磷含量降低,间接影响了渗漏液磷的流失量。

Deluca 等认为生物炭可以通过提高土壤 pH 值和 CEC 来提高土壤磷素的有效性,主要可以通过减少铁和铝的交换量而增加磷的活性^[16]。Mukherjee 等猜测生物炭通过表层阳离子桥键作用吸附土壤

磷素,进而影响磷素的有效性^[17]。本试验结果表明,施用木醋液对表层土壤速效磷的含量有增加、对难溶性 Al-P 含量有降低趋势,生物炭显著增加了表层土壤速效磷含量、降低难溶性 Al-P 含量,无论施用生物炭或者木醋液都能显著降低 Fe-P 含量,炭醋混施的效果最明显。0~10 cm 为盆栽白菜的耕层土壤,速效磷可被作物吸收利用,20~30 cm 深度的土壤距离根系较远,速效磷难以被作物利用,养分随土壤颗粒和溶液迁移流失。20~30 cm 与 0~10 cm 土壤速效磷含量比值越小,被根系吸收的养分有效性越高。施用生物炭、木醋液后能明显降低 20~30 cm 与 0~10 cm 土层速效磷含量比值。炭醋材料能提高表层土壤磷素对白菜的供应能力,减少磷的固定。磷酸酶是一种能够将对底物去磷酸化的酶,即通过水解磷酸单酯将底物分子上的磷酸基团除去,并生成磷酸根离子和自由羟基^[18]。施用生物炭、木醋液后白菜根际土磷酸酶活性分别提高 31.19%、33.41%,炭醋混施可增强两者的施用效果,提高了 72.12%。磷酸酶活性越高,越能增加土壤的速效磷含量,减少磷的固定,从而更大程度上满足白菜对磷素的需求量。炭醋材料的含氧官能团提高了土壤阳离子交换量,使磷吸附在土壤中^[19-21]。炭醋材料富含丰富的孔隙结构,增加了土壤的保水性,减少了水溶性污染物随水迁移、流失^[22-24]。因此,炭醋材料特性优势的双重作用下,减少了总磷流失。

4 结论

炭醋材料能提高肥料利用率,减少磷养分的流失。施用炭醋材料后,表层土壤速效磷含量提高,磷酸酶活性增强,难溶性 Fe-P、Al-P 含量降低,同时白菜对磷的吸收量增加,减少了水溶性磷和颗粒态磷的渗漏流失,是总磷流失量减少的主要原因。

参考文献:

- [1] 李杰,石元亮,陈智文.我国南方红壤磷素研究概况[J].土壤通报,2011,42(3):763-768.
- [2] 赵学强,沈仁芳.提高铝毒胁迫下植物氮磷利用的策略分析[J].植物生理学报,2015,51(10):1583-1589.
- [3] 夏丽丹,曹升,张虹,等.不同水分条件下生物炭对红壤磷素形态及磷酸酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(5):1101-1111.
- [4] 刘惠见,邓洪,黄维恒,等.滇池流域不同利用方式下红壤磷素渗漏环境风险评价[J].中国土壤与肥料,2019(2):54-60.
- [5] Rashmi I, Biswas A K, Kartika K S, et al. Phosphorus leaching through column study to evaluate P movement and vertical distribution in black, red and alluvial soils of India[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2020, 19(3): 241-248.
- [6] 袁帅,赵立欣,孟海波,等.生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1402-1417.
- [7] Uchimiya M, Klasson K T, Wartelle L H, et al. Influence of soil properties on heavy metal sequestration by biochar amendments: 1. Copper sorption isotherms and the release of cations[J]. Chemosphere, 2011, 82: 1431-1437.
- [8] 韦思业.不同生物质原料和制备温度对生物炭物理化学特征的影响[D].广州:中国科学院大学,2017:39-60.
- [9] 高海英,陈心想,张雯,等.生物炭和生物炭基氮肥的理化特征及其作物肥效评价[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(4):69-78,85.
- [10] 张千丰,王光华.生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展[J].土壤与作物,2012,1(4):219-226.
- [11] 张伟明.生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D].沈阳:沈阳农业大学,2012:25-36.
- [12] 王丽英,郭丽,史建硕,等.木醋液在农业上的应用进展[J].农业工程技术,2020,40(29):88-89.
- [13] 刘长风,李敏,高品一,等.木醋液的来源、成分及其应用研究进展[J].中国农学通报,2016,32(1):28-32.
- [14] 卢辛成,蒋剑春,孙康,等.木醋液的制备、精制与应用研究进展[J].林产化学与工业,2017,37(3):21-30.
- [15] 平安,杨国亭,于学军.木醋液在农业上的应用研究进展[J].中国农学通报,2009,25(19):244-247.
- [16] Deluca T H, Gundale M J, MacKenzie M D, et al. Biochar effects on soil nutrient transformations [M]//Biochar for environmental management: science and technology. London: Routledge, 2009: 251-270.
- [17] Mukherjee A, Zimmerman A, Harris W, et al. Surface chemistry variations among series of laboratory-produced biochars[J]. Geoderma, 2011, 163(3): 247-255.
- [18] 钟传青,黄为一.不同种类解磷微生物的溶磷效果及其磷酸酶活性的变化[J].土壤学报,2005,42(2):286-294.
- [19] 陈再明,陈宝梁,周丹丹.水稻秸秆生物炭的结构特征及其对有机污染物的吸附性能[J].环境科学学报,2013,33(1):9-19.
- [20] Shenbagavalli S, Mahimairaja S. Characterization and effect of biochar on nitrogen and carbon dynamics in soil[J]. International Journal of Advanced Biological Research, 2012, 2(2): 249-255.
- [21] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等.玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究[J].农业环境科学学报,2015,34(2):310-318.
- [22] 李卓瑞,韦高玲.不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J].生态环境学报,2016,25(2):333-338.
- [23] Zheng J Y, Stewart C E, Cotrufo M F. Biochar and nitrogen fertilizer alters soil nitrogen dynamics and greenhouse gas fluxes from two temperate soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(5): 1361-1370.
- [24] Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. Clean - Soil Air Water, 2014, 41(5): 626-634.