doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.030

生物炭配施沼液对淋溶状态下土壤养分的影响

王忠江[1,2]　张　正[1]　刘　卓[1]　王丽丽[1]　司爱龙[1]　曹　振[1]

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 寒地农业可再生资源利用技术与装备黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探讨生物炭配施沼液对土壤养分淋失的影响,通过室内土柱试验,采用三因素三水平正交试验方法,系统研究了生物炭添加量、淋溶强度、沼液施加量对土壤养分淋失及土壤养分垂直分布的影响规律。结果表明,土壤养分淋失主要集中在前 8 次,后期淋失量均维持在较低水平并趋于稳定。各因素对氨态氮、速效磷、速效钾淋失的影响由大到小依次为淋溶强度、生物炭添加量、沼液施加量,而对硝态氮淋失量的影响由大到小依次为生物炭添加量、沼液施加量、淋溶强度。添加生物炭能明显减少养分淋失,且添加生物炭的 0 ~ 20 cm 深度土壤的养分明显高于未添加生物炭的 20 ~ 40 cm 土壤,各因素对氨态氮、硝态氮、速效钾在土壤中的含量影响差异显著,而对速效磷的影响则无显著差异。

关键词: 生物炭; 沼液; 土壤; 养分; 淋溶

中图分类号: S147.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)11-0260-08

Effects of Biochar Combined with Biogas Slurry on Soil Nutrients in Leaching State

WANG Zhongjiang[1,2]　ZHANG Zheng[1]　LIU Zhuo[1]　WANG Lili[1]　SI Ailong[1]　CAO Zhen[1]

(1. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*

2. *Heilongjiang Key Laboratory of Technology and Equipment for the Utilization of Agricultural Renewable Resources*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: The leaching loss of soil nutrients along with water is serious in the process of agricultural planting, it not only wastes fertilizer resources, but also causes eutrophication of surface water and further threatens groundwater quality, and the phenomenon is more serious during the application of liquid bio-organic fertilizer biogas slurry. Biochar has strong adsorption due to its special physical and chemical properties, adding biochar to soil to reduce the loss of nutrient has become a research focus. However, its leaching process and law still need to be further studied. To investigate the effects of soil nutrient leaching after biogas slurry was applied under different conditions, the orthogonal design of three-factor and three-level $L_9(3^3)$ was adopted through indoor soil column simulation test. The effects of biochar addition amount (2%, 5% and 10%), leaching intensity (46 mL, 137 mL and 250 mL) and biogas slurry addition amount (100 mL, 200 mL and 300 mL) on soil nutrient leaching and vertical distribution of soil nutrients after leaching were systematically studied. The results showed that soil nutrient leaching was mainly concentrated in the early stage of leaching (leaching was mainly concentrated in the first five times of leaching), the leaching loss amount remained at a low level and gradually became stable at later stage. The effects of various factors on the leaching loss of ammonia nitrogen, rapidly available phosphorus and rapidly available potassium were successively the leaching strength, amount of biochar added and amount of biogas slurry applied, however, the effects on the loss amount of nitrate nitrogen leaching were successively the amount of biochar, amount of biogas slurry and leaching intensity. Compared with the control group, the nutrient leaching loss of biochar treatment was significantly reduced. The content of various nutrients of the soil with depth of 0 ~ 20 cm added with biochar was significantly higher than that of the soil with depth of 20 ~ 40 cm without biochar. The effects of various factors on the content of

收稿日期: 2018-05-27　修回日期: 2018-08-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51406032)、黑龙江省自然科学基金项目(E201406)、中央引导地方科技发展专项(ZY17C05)、黑龙江省博士后基金项目(LBH-13044Z)和教育部留学回国人员科研启动基金项目(20131792)

作者简介: 王忠江(1978—),男,教授,主要从事农业生物环境与能源工程研究,E-mail: neauwzj@126.com

ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and rapidly available potassium in soil were significantly different in longitudinal depth, but there was no significant difference on the content of rapidly available phosphorus. The experiment laid a theoretical foundation for the research on leaching effect of biochar addition and biogas slurry application on soil nutrients, the research and application of biochar as a soil improvement additive as well as the scientific and reasonable application of biogas slurry in the field production can be accelerated.

Key words: biochar; biogas slurry; soil; nutrient; leaching

0　引言

我国是一个农业大国,广大农户为了追求粮食产量在生产过程中大量甚至过量施用化肥已成为一个普遍现象[1]。但是,施用在耕地的肥料仅有一部分被作物吸收,一般作物对于肥料的利用率不高于30%,其余大部分随雨水或者灌溉水的下渗而向下迁移,不仅导致资源浪费,还造成地下水污染[2-4]。同时,我国近年来大力提倡有机农产品的生产,沼液作为一种非常好的生物有机肥得到了一定的应用和推广[5-6],但沼液是一种液态肥,施用后更容易下渗到较深层土壤,使沼液中的养分得不到有效利用,并污染地下水[7-9]。

生物炭是生物质在高温低氧或无氧条件下,高温裂解而产生的一类化学性质稳定的高度芳香化富碳固体物质[10]。生物炭孔隙结构发达、比表面积巨大,有较强的吸附性能,作为一种新型的功能材料添加到土壤中,对改良土壤的物理化学性质,提高作物生产效率发挥重要作用[11-13]。研究表明,生物炭添加土壤后能够增加土壤对于其营养元素的持留能力,增加养分含量,减少其淋溶损失[14-17]。目前,对于生物炭对土壤的研究主要集中在生物炭对于土壤的理化性质影响,以及土壤营养的特定矿质元素的淋失和转化的影响研究[18-19],使用的肥料也都为固态的化肥,而使用液态生物有机肥沼液的相关研究鲜见报道。因此,探明在施用液态生物有机肥沼液的条件下,影响土壤主要营养元素的因素主次顺序,掌握各种因素条件下对主要营养元素的淋溶动态的影响规律,以及淋溶后土壤垂直剖面主要营养元素的含量分布,对于生物炭和肥料的正确、高效利用具有重要参考意义。但目前对于此方面的系统性研究较少。本文对添加生物炭土壤的氨态氮、硝态氮、速效磷、速效钾营养元素在淋溶条件下的淋失动态和伴随淋溶的养分下渗后土壤养分分布,以及影响养分淋失的生物炭添加量、淋溶强度和沼液添加量 3 种因素的作用规律进行系统性研究,以期为生物炭和沼液的资源化科学利用奠定理论基础。

1　材料与方法

1.1　试验时间及供试材料

试验于 2017 年 10—12 月在东北农业大学生物质能源试验室进行。试验所用土壤(砂壤土)取自东北农业大学工程学院西侧试验田(45°45′28.66″N, 126°43′45.54″E),土样采集深度为地表耕层 0 ~ 20 cm,采样自然风干后破块,剔除肉眼可见根系残叶等有机物质,过 2 mm 筛备用。试验用生物炭为杨木炭,生产后研磨粉碎过 1 mm 筛。所用生物炭的 BET 比表面积为 14.316 m^2/g,总氮质量比为 5 669.27 mg/kg,硝态氮质量比为 4.58 mg/kg,速效钾质量比为 2 970 mg/kg。所用沼液取自哈尔滨呼兰市孟家乡养殖场,发酵原料为猪粪,沼液的总固体质量分数为 0.36%,pH 值为 7.72,粘度 1.58 mPa·s,总氮质量浓度 862.47 mg/L,氨态氮质量浓度为 762.21 mg/L,硝态氮质量浓度为 27.839 mg/L,速效磷质量浓度为 9.324 mg/L,速效钾质量浓度为 490.68 mg/L。所用土壤类型为砂壤土,土壤容重为 1.12 g/cm^3,总固体质量分数为 84.49%,pH 值为 7.45,有机质质量比为 48.0 g/kg,硝态氮质量比为 5.59 mg/kg,氨态氮质量比为 0.685 mg/kg,速效磷质量比为 1.29 mg/kg,速效钾质量比为 8.45 mg/kg,土壤的颗粒含量分别为:砂粒 65.04%、粉粒 24.37%、黏粒 10.59%。

1.2　试验设计

在室温((20 ± 2)℃)条件下,通过室内土柱模拟试验,采用正交试验设计方法进行三因素三水平试验,系统研究生物炭添加量、淋溶强度和沼液施加量对氨态氮、硝态氮、速效磷、速效钾养分淋失动态规律和淋溶结束后土壤垂直剖面上各主要养分含量分布的影响规律,根据小雨、中雨和大雨的降雨强度以及试验所用土柱的截面积计算出本试验每次的总淋溶量分别为 46、137、250 mL。试验各因素设置水平见表 1。试验共设 9 个处理,分别为 2% 生物炭添加量 + 46 mL 淋溶强度 + 100 mL 沼液施加量(处理 1)、2% 生物炭添加量 + 137 mL 淋溶强度 + 200 mL 沼液施加量(处理 2)、2% 生物炭添加量 + 250 mL 淋溶强度 + 300 mL 沼液施加量(处理 3)、5% 生物

炭添加量 +46 mL 淋溶强度 +200 mL 沼液施加量(处理 4)、5% 生物炭添加量 +137 mL 淋溶强度 +300 mL 沼液施加量(处理 5)、5% 生物炭添加量 +250 mL 淋溶强度 +100 mL 沼液施加量(处理 6)、10% 生物炭添加量 +46 mL 淋溶强度 +300 mL 沼液施加量(处理 7)、10% 生物炭添加量 +137 mL 淋溶强度 +100 mL 沼液施加量(处理 8)、10% 生物炭添加量 +250 mL 淋溶强度 +200 mL 沼液施加量(处理 9)。另外设 0% 生物炭添加量 +46 mL 淋溶强度 +0 mL沼液施加量(处理 10)和 0% 生物炭添加量 +46 mL淋溶强度 +200 mL 沼液施加量(处理 11)两组试验为对照组。

表 1 正交试验因素水平

Tab. 1 Levels and factors of orthogonal test

水平	因素		
	生物炭添加量/%	淋溶强度/mL	沼液施加量/mL
1	2	46	100
2	5	137	200
3	10	250	300

1.3 试验方法

试验所用土柱为聚氯乙烯圆柱管,土柱的内径 10 cm,高 50 cm,底座打孔作为漏水孔,收集淋溶液。装土前土柱底层设置 3 cm 厚用去离子水洗干净后自然风干的石英砂,并铺上两层纱布,过滤淋溶液,防止土壤颗粒影响淋溶液性质。为减少试验误差,并保证各试验组的可比性,在试验土柱的装填过程需要设置统一的装填标准,在参照文献[20 - 21]的基础上,选择本试验土柱的容重为 1.12 g/cm^3。之后按照所确定容重将供试土壤混匀填入土柱,因实际生产过程中生物炭主要添加在表层,故设置试验装土 40 cm 高,其中上层 0 ~ 20 cm 为土壤和生物炭混合土样,下层 20 ~ 40 cm 为原土壤。分层将试供土壤装入土柱,压实边缘,避免贴壁缝隙形成边际效应。表层再铺设两层纱布和石英砂,减少淋溶对土壤的冲击和干扰。试验过程中,各处理先添加去离子水 1 000 mL 至土壤饱和,然后施加沼液,之后每日进行淋溶处理并收集淋溶液。所收集淋溶液,过滤后采用连续流动分析仪(SAN + +,荷兰 SKALAR 公司)测定氨态氮、硝态氮、速效磷、速效钾的养分含量。淋溶结束后,测定土壤垂直方向不同深度剖面的土壤中各养分含量的质量比,取样时垂直方向每 5 cm 为一个剖面取样点。

土壤中各种营养元素含量的测定,称取新鲜土壤样品 10.0 g 于三角瓶中加入超纯水 50 mL 后进行浸提处理。在(20 ±2)℃的恒温水浴振荡器中振荡提取 1 h,转移 40 mL 混合液于 50 mL 聚乙烯离心管中,在 3 000 r/min 条件下离心分离 10 min,取上清液用流动分析仪测定。

数据处理与分析软件为 Microsoft Excel 2013、Origin 9.1 和 SPSS 22.0。

2 结果与讨论

2.1 氨态氮养分淋溶规律

淋溶试验过程渗滤液中氨态氮含量如图 1 所示。

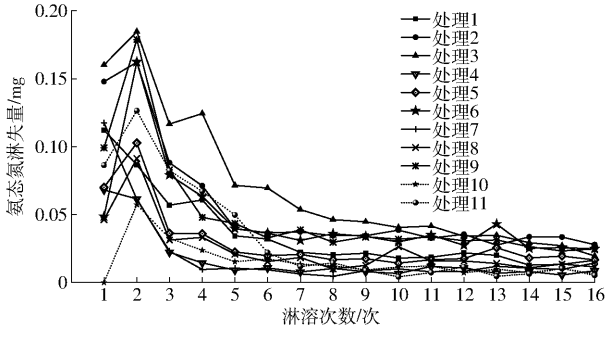

图 1 渗滤液中氨态氮含量变化

Fig. 1 Variation of ammonia nitrogen content in leaching water

从图 1 可看出,各试验组渗滤液中的氨态氮含量的整体变化规律基本一致,各试验组养分淋失量主要集中在试验前 8 次淋溶,即整个试验前期,之后渗滤液中的氨态氮含量逐渐减少并趋于稳定,其氨态氮淋失规律与高德才等[22]研究相吻合。但各组在渗滤液中氨态氮含量变化幅度方面仍存在一定的差异,如处理 3 的生物炭添加比例较小,而淋溶强度和沼液添加量均为最大时,其渗滤液中的氨态氮含量在整个试验过程中的大部分时间内均处于较高水平。而对照试验组即处理 11 施加沼液未添加生物炭的处理组,与处理 4 沼液施加量和淋溶强度相同的添加生物炭组相比,试验前 8 次渗滤液中的氨态氮含量均高于添加生物炭的处理 4 组,试验期间养分淋失累积量多出 50.47%,这表明在土壤中添加生物炭能显著增加土壤对氨态氮的滞留效果,可以达到较好的缓释目的。此外从图中还可以看出第 1 次淋溶(即施加沼液)时所得到的渗滤液中氨态氮含量相对较低,第 2 次淋溶时所得渗滤液中氨态氮含量升高,这表面上与沼液的氨态氮含量高而水及土壤的氨态氮含量低的现实相矛盾,主要是由于在本试验进行施加沼液及淋溶之前先添加 1 000 mL 去离子水使土壤处于饱和状态,当第 1 次淋溶(即施加沼液)时从土柱底部渗出淋溶液主要是施加沼液前添加的去离子水,而第 2 次淋溶时从土柱底部渗出淋溶液主要是第 1 次淋溶(即施加沼液)时添加的沼液,所以才会出现第 1 次淋溶(即施加沼液)时所得渗滤液中氨态氮含量相对较低,而第 2 次淋溶时所得渗滤液中氨态氮含量相对较高的现象。

淋溶结束后土壤中垂直剖面氨态氮含量分布如图 2 所示。

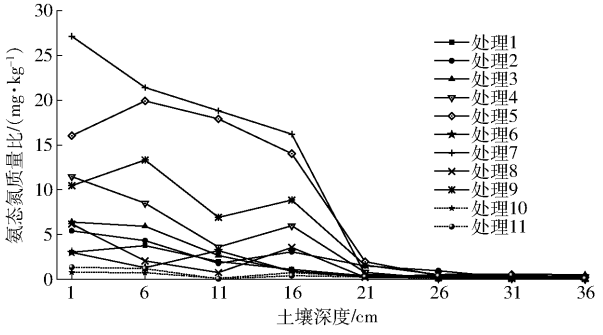

图 2　土壤中氨态氮质量比变化

Fig. 2　Variation of ammonia nitrogen mass ratio in soil

从图 2 可看出，各添加生物炭处理组的土壤氨态氮养分主要分布在上层土壤。添加生物炭的 0 ~ 20 cm 深度土壤氨态氮的含量显著高于未添加生物炭的下层 20 ~ 40 cm 深度土壤，未添加生物炭的处理 10 和处理 11 土壤氨态氮含量随着土壤深度的增加，基本无明显变化且始终处于较低水平，这主要是由于生物炭具有较好的对氨态氮养分的滞留效果，使沼液中的氨态氮养分在较强的水淋溶状态下仍大量存留在施加生物炭的 0 ~ 20 cm 土壤有效耕层内。但添加生物炭的上层 0 ~ 20 cm 深度土壤中氨态氮含量变化在不同处理之间存在一定差异，处理 5 和处理 9 在 0 ~ 5 cm 深度其含量有所上升，其余添加生物炭处理组则在 0 ~ 10 cm 深度土壤中的氨态氮质量比的变化规律基本保持一致，且呈减少趋势，在 15 cm 深度又有小幅度增加。添加生物炭层，处理 5 和处理 7 的氨态氮质量比显著（$P < 0.05$）高于其他处理组，其次是处理 9，其余处理组的质量比则相对更加集中，差异不大，在 0.05 的置信区间无显著差异性，这可能是因为处理 5 和处理 7 施加沼液量都为最大，生物炭添加量比较大，并且淋溶强度相对较小都有利于氨态氮养分在土壤中的存留。而在未添加生物炭的 20 ~ 40 cm 深度土壤氨态氮在较低的含量水平，保持稳定在 1 mg/kg 以下，且下层土壤氨态氮养分含量各处理之间在 0.05 置信区间也无显著差异性。

2.2　硝态氮养分淋溶规律

淋溶试验过程渗滤液中硝态氮含量如图 3 所示。

从图 3 可看出，在试验过程中各处理组的硝态氮养分淋失量的变化规律基本一致，由于硝态氮的养分存在形式是带负电荷的阴离子，土壤以及生物炭对其吸附力较弱，各试验组硝态氮养分淋失集中在试验前期，在第 8 次淋溶之后各处理组硝态氮养分淋失量接近于零，基本无硝态氮养分的淋失，其养分淋失规律与邢英等[23]研究相吻合。各施加沼液

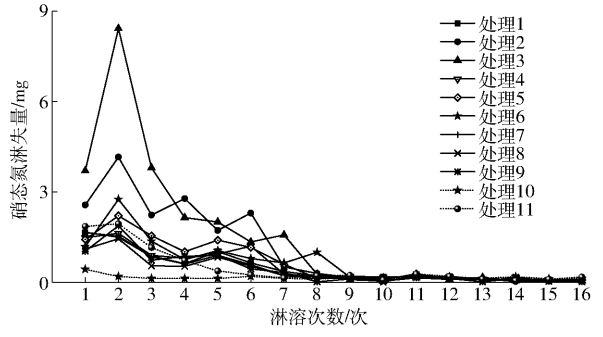

图 3　渗滤液中硝态氮含量变化

Fig. 3　Variation of nitrate nitrogen content in leaching water

处理组硝态氮养分淋失均在第 2 次淋溶时达到最大，在第 3 次迅速下降，之后保持缓慢下降趋势，直到养分淋失量接近于零。处理 3 在第 8 次养分淋失量接近零前，养分淋失量显著（$P < 0.05$）高于其他处理组，其次是处理 2，其余处理组的淋失量则无显著差异，这主要是因为该两组处理添加生物炭量最少，而沼液施加量和淋溶强度又相对较大。施加沼液组的硝态氮淋失量显著（$P < 0.05$）高于未施加沼液的对照处理 10，未施加沼液处理仅在前两次淋溶过程中有少量养分淋出，这说明施用沼液虽然可以显著增加土壤中的硝态氮等营养成分含量，但在降水量较大的地区，如果不采取添加具有高吸附特性的生物炭等材料，则沼液中的养分不但无法保证被作物充分吸收，也存在较大的淋溶损失并污染地下水源的风险。在淋溶强度和沼液添加量相同的试验条件下添加生物炭的处理 4 相对于未添加的对照组处理 11，硝态氮养分累积淋失量减少 12.13%，表明添加生物炭能够减少土壤淋溶状态下的硝态氮淋失，但减少幅度明显小于氨态氮。

淋溶结束后土壤垂直剖面硝态氮含量如图 4 所示。

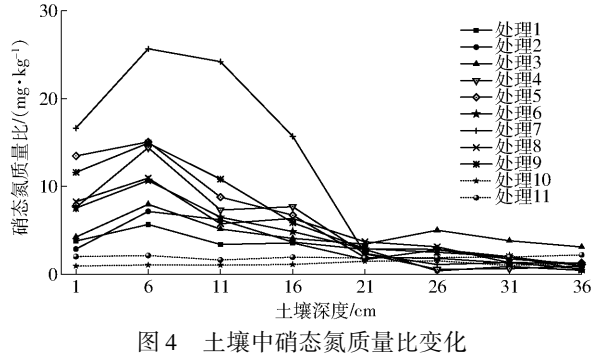

图 4　土壤中硝态氮质量比变化

Fig. 4　Variation of nitrate nitrogen mass ratio in soil

从图 4 可看出，添加生物炭处理的试验组在垂直方向的硝态氮含量变化趋势基本一致，即在 0 ~ 6 cm 的深度范围内随着深度的加大土壤中的硝态氮含量逐渐升高，并在 6 cm 深度处各组的硝态氮含量达到各自的最高值，之后开始逐渐下降，并在原土

交界处减少至较低水平,在下层 20 ~ 40 cm 土壤中养分含量随深度的增加无显著变化。各添加生物炭的处理组上层取样点硝态氮含量均高于下部分的原土层,可见生物质炭对于硝态氮随水向下迁移有较好的滞留作用。添加生物质炭的处理 4 在 0 ~ 20 cm 硝态氮含量显著($P < 0.05$)高于对照处理 11,表明生物炭对于硝态氮有吸附作用,添加生物质炭可以增加土壤中硝态氮养分含量。硝态氮为负电荷离子,相较于其他养分离子,不易被生物炭以及土壤团粒结构吸附[24],所以在土壤表面淋溶处理后,养分向下迁移集中在 6 cm 深度左右。所有处理组下层原土中硝态氮的含量无明显差异,硝态氮随水向下迁移并不会增加下层土壤的养分含量。此外,虽然淋溶后期各处理淋溶液中已基本无硝态氮养分淋出,但淋失结束后添加生物炭处理组 0 ~ 20 cm 深度的混施炭层仍存在大量硝态氮养分,这说明生物炭对硝态氮具有较好的吸附性,但生物炭对硝态氮的吸附也有一个饱和吸附量。

2.3 速效磷养分淋溶规律

淋溶试验过程渗滤液中速效磷含量如图 5 所示。

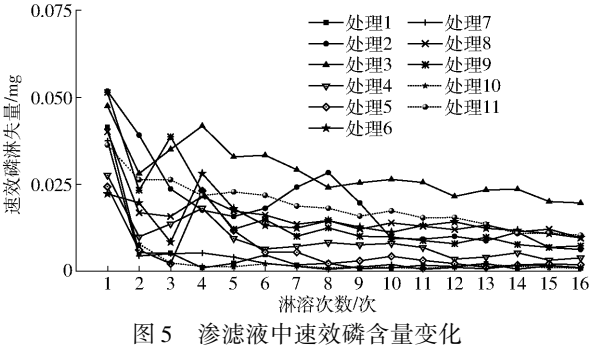

图 5 渗滤液中速效磷含量变化

Fig. 5 Variation of available phosphorus content in leaching water

从图 5 可看出,在淋溶过程中各试验组渗滤液中的速效磷含量在各自的养分含量水平没有出现较大的波动点,各试验组在前两次淋溶渗滤液中速效磷含量的变化规律相一致,均呈现减少趋势。各试验组渗滤液养分含量达到最低点后,再次上升达到一个较高值后开始小幅度下降,并逐渐趋于稳定,这与生物炭对速效磷养分的吸附,以及养分在淋溶状态下的向下迁移有关。但各试验组再次出现的渗滤液养分含量的较大值的时间有所差异,多数处理出现在第 4 次淋溶,处理 9 略有提前,出现在第 3 次淋溶,可能是因其最大的生物炭添加量增加了上层土壤的孔隙度,并有最大的淋溶强度。处理 4 的渗滤液中速效磷含量的最大值出现在第 8 次,而沼液添加量和淋溶强度相同但无生物炭添加的对照试验组处理 11,养分淋失集中在前两次淋溶过程,之后基本无养分随渗滤液流失。试验后期渗滤液中速效磷含量的稳定值,具有最少生物炭添加量,较大淋溶强度以及较大沼液施加量的处理 3 显著($P < 0.01$)高于其他处理组,处理 1、处理 7 和处理 10 接近零,几乎不再有速效磷养分的淋失。

淋溶结束后土壤垂直剖面速效磷含量如图 6 所示。

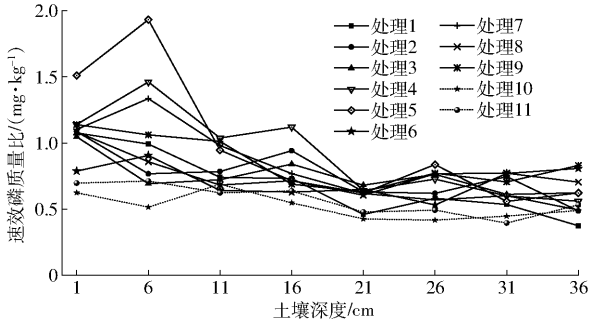

图 6 土壤中速效磷质量比变化

Fig. 6 Variation of available phosphorus mass ratio in soil

从图 6 可看出,各处理速效磷养分含量变化总趋势随着土壤深度的增加略有下降,其养分主要集中在表层和 6 cm 左右深度。添加生物炭的 0 ~ 20 cm 深度土层的各剖面土壤中的速效磷含量的平均值略高于未添加生物炭的下层土壤,且上层变化波动较大,未添加生物炭的下层 20 ~ 40 cm 深度原土壤中养分含量则相对稳定。说明土壤中添加生物炭对速效磷养分也有一定的滞留效果,与 YAO 等[25]研究结果相吻合。各试验组土壤垂直剖面速效磷含量变化趋势存在一定差异,处理 5、处理 4、处理 7 和处理 6 主要集中在 6 cm 深度,其中以处理 5 的含量最高,达到 1.93 mg/kg,之后随深度增加整体呈现下降趋势,其他处理则无明显规律特性。对照试验组处理 11 施加沼液未添加生物炭的处理组,其养分含量在各深度剖面均低于沼液添加量和淋溶强度相同的添加生物炭试验组处理 4,其垂直方向养分含量分布也相对更加具有一致性,说明生物质炭对土壤中的速效磷具有较好的吸附效果。

2.4 速效钾养分淋溶规律

淋溶试验过程渗滤液中速效钾含量如图 7 所示。

从图 7 可看出,各试验处理组渗滤液中的速效钾养分含量变化相一致,淋溶开始至第 2 次下降,在之后的淋溶渗滤液中速效钾养分含量呈现先上升再下降的趋势,在淋溶后期下降缓慢并逐渐趋于稳定。但各组在渗滤液中速效钾养分含量上升过程的时间,以及变化幅度存在一定差异,试验处理 1、处理 2、处理 3 共 3 组淋溶液中速效钾含量率先在第 6 次及之前淋失时增加到最大值后开始缓慢减少,而其余处理组则均在第 7 次及之后淋失更迟地达到养分

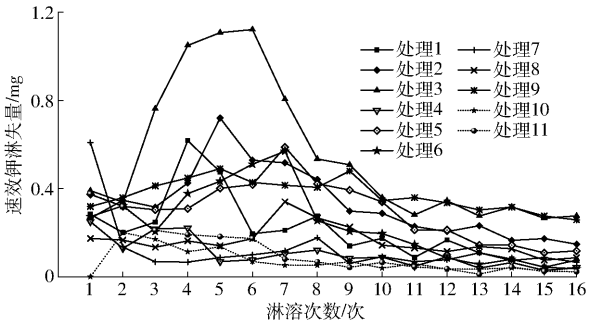

图 7　渗滤液中速效钾含量变化

Fig. 7　Variation of available potassium content in leaching water

淋失最大量,这是由于此 3 组处理生物炭均为最小添加量,使得生物炭对速效钾养分的吸附滞留作用相对较弱。此外,由于处理 3 生物炭添加量较少,却有着最大的沼液添加量和最大的淋溶强度,在整个淋溶过程中其淋溶液中速效钾的含量基本处于最高水平,其含量的变化幅度也相对更大。而试验对照组未添加生物炭的处理 10 和处理 11 渗滤液中速效钾养分含量则随着淋溶的进行呈减少趋势,并淋失集中在前期,在第 7 次淋溶之后逐渐达到稳定状态,稳定后淋溶液中速效钾含量水平低于其余试验组。

淋溶结束后土壤垂直剖面速效钾含量如图 8 所示。

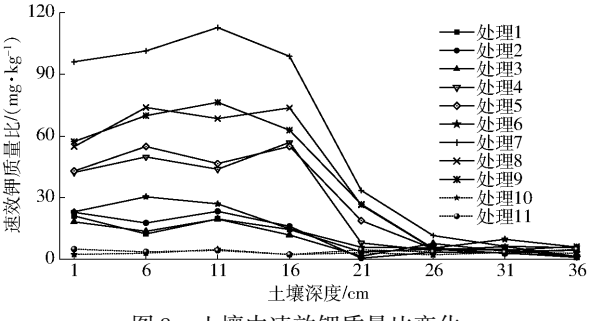

图 8　土壤中速效钾质量比变化

Fig. 8　Variation of available potassium mass ratio in soil

从图 8 可看出,各试验组处理垂直方向剖面,上层 0 ~ 20 cm 层土壤中速效钾含量有较大差异,其分布特征也存在一定差异,在添加生物炭土壤和原土交界处其速效钾养分含量迅速降低,之后随深度增加各处理组中的速效钾含量逐渐趋于稳定,并均维持在一个较低的水平,说明各个因素均对下层土壤中速效钾含量无明显影响。各试验组添加生物炭的上层 0 ~ 20 cm 层土壤中速效钾含量显著($P < 0.05$)高于未加生物炭的下层土壤,其中以最大生物炭添加量及最小淋溶强度和最多沼液添加量的处理 7 的含量最高,平均质量比 102.28 mg/kg,与其他各组的差异达到极显著水平($P < 0.01$)。上层 0 ~ 20 cm 添加生物炭土层中垂直剖面速效钾含量分布,处理 7、处理 8 和处理 9 主要分布在 5 ~ 15 cm 深度,其余处理各剖面速效钾含量小幅度变化,相对较稳定,无明显特征。两个对照处理组,土壤中速效钾养分含量在整个垂直剖面相对一致,无明显变化,含量也是所有处理中最少,在 3 mg/kg 左右。说明添加生物炭不仅提高了整体速效钾养分含量,对垂直剖面养分分布特性也产生影响。这主要是由于生物炭能够有效吸附钾离子的特性,同时其本身也携有大量速效钾养分[26]。

2.5　养分淋溶规律因素分析

各试验组累积养分淋失量结果与极差和方差分析如表 2 和表 3 所示,A、B、C 分别为生物炭添加量、淋溶强度和沼液施加量水平值。

表 2　累积养分淋失量结果与极差分析

Tab. 2　Range analysis of accumulation leaching loss of nutrient

试验序号	因素			累积养分淋失量/mg			
	A	B	C	氨态氮	硝态氮	速效磷	速效钾
1	1	1	1	0.71	8.70	0.15	4.25
2	1	2	2	1.03	18.28	0.38	6.03
3	1	3	3	1.25	25.08	0.51	9.62
4	2	1	2	0.45	9.72	0.19	2.52
5	2	2	3	0.62	11.57	0.18	6.12
6	2	3	1	0.92	11.56	0.29	4.81
7	3	1	3	0.53	9.37	0.13	3.26
8	3	2	1	0.59	7.27	0.33	3.66
9	3	3	2	1.00	8.66	0.32	7.28
极差	A			0.33	8.92	0.13	2.15
	B			0.50	5.84	0.21	3.90
	C			0.09	6.16	0.04	2.10
因素影响顺序				$B > A > C$	$A > C > B$	$B > A > C$	$B > A > C$

表 3　累积养分淋失量方差分析

Tab. 3　Variance analysis of accumulation leaching loss of nutrient

目标	来源	平方和	自由度	均方	F	P
氨态氮淋失量	A	0.198	2	0.099	29.568	0.033
	B	0.377	2	0.188	56.204	0.017
	C	0.120	2	0.006	1.823	0.345
硝态氮淋失量	A	126.947	2	63.473	3.987	0.201
	B	51.154	2	25.577	1.607	0.384
	C	56.900	2	28.450	1.787	0.359
速效磷淋失量	A	0.025	2	0.013	0.985	0.504
	B	0.700	2	0.035	2.720	0.269
	C	0.003	2	0.001	0.104	0.906
速效钾淋失量	A	8.317	2	4.158	3.934	0.203
	B	22.761	2	11.381	10.767	0.085
	C	6.584	2	3.292	3.114	0.243

从表 2 的各养分累积淋失量的极差分析可知,3 种因素生物炭添加量、淋溶强度和沼液施加量对氨态氮、速效磷、速效钾的淋失量影响大小顺序表

现一致,其中淋溶强度对此 3 种养分的淋失影响最大,其次是生物炭添加量,沼液施加量影响最小。硝态氮所受因素影响规律与其他养分不同,生物炭添加量影响最大,其次是沼液施加量,而淋溶强度对其影响最小,这可能是因为硝态氮不易被土壤团粒结构所吸和生物炭表面集团所吸附的性质[16],易随水迁移流失,导致硝态氮在试验过程前期已大量淋失,而后期淋溶只有极少量淋出,使得淋溶强度对于硝态氮的淋失影响小于其他两个因素。从表 2 中的各养分指标累积淋失量还可知,当生物炭添加量 10% 时,对于减少养分的淋失有较好作用效果。综合累积养分淋失量分析,各处理约 50% ~90% 的养分在前 5 次淋溶时随渗滤液滤出。试验方差分析结果见表 3,可知生物炭添加量和淋溶强度对于氨态氮累积淋失量有显著影响($P<0.05$),其余因素对累积养分淋失影响并不显著,这一方面由于氨态氮具有挥发性的特点,而添加生物炭的上层耕层中对于氨态氮的吸附作用较强,能够有效减少氨态氮的挥发[7],另一方面因为添加生物炭增加了土壤的阳离子交换量,对于吸附带正电的氨根离子产生积极作用[24]。因此在施加氨态氮肥时要注意参考耕地生物炭添加量以及选择合适的浇水灌溉量,以减少养分损失,提高农业生产资料的利用效率。

3 结论

(1)生物炭添加量、淋溶强度、沼液施加量会直接影响淋溶过程养分淋失,各因素影响大小根据养分类型有所不同。氨态氮、速效磷、速效钾相同,影响由大到小依次为淋溶强度、生物炭添加量、沼液施加量,而对于硝态氮淋失,则生物炭添加量为主要影响因素。在试验范围内生物炭添加量和淋溶强度对于氨态氮累积淋失量有显著影响。综合本试验各项主要指标的变化规律,当生物炭添加量为 10% 时,对土壤养分的滞留具有较好的效果。

(2)土壤养分淋失主要集中在淋溶前期,各处理前 5 次累积养分淋失量所占总淋失量的比例在 50% ~90% 之间。

(3)淋溶结束后土壤垂直剖面养分含量分布规律根据养分含量不同而有所差异,整体来说土壤 0 ~20 cm深度含生物炭层土壤中各种养分含量均显著高于未添加生物炭的 20 ~40 cm 深度的下层土壤,添加生物炭可有效增加淋溶状态下养分在土壤中的滞留。

参 考 文 献

1 史常亮, 郭焱, 朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(4):671 -679.
SHI Changliang, GUO Yan, ZHU Junfeng. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(4): 671 -679. (in Chinese)

2 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7):494 -499.
LÜ Gang, WU Xiangyun. Review on influential factors of soil infiltration characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(7):494 -499. (in Chinese)

3 吴树彪, 崔畅, 张笑千,等. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8):118 -125. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20130821&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.021.
WU Shubiao, CUI Chang, ZHANG Xiaoqian, et al. Effect of biogas slurry on yield increase, quality improvement, water and soil environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):118 -125. (in Chinese)

4 尉元明, 朱丽霞, 乔艳君,等. 干旱地区灌溉农田化肥施用现状与环境影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(5):65 -69.
WEI Yuanming, ZHU Lixia, QIAO Yanjun, et al. The agricultual fertilization and its impact on the environment in the arid area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003, 17(5):65 -69. (in Chinese)

5 BANIK S, NANDI R. Effect of supplementation of rice straw with biogas residual slurry manure on the yield, protein and mineral contents of oyster mushroom [J]. Industrial Crops & Products, 2004, 20(3):311 -319.

6 白昕, 李亚男, 刘双全. 有机沼液生物肥对蔬菜品质的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(8):75 -78.
BAI Xin, LI Ya'nan, LIU Shuangquan. Impacts of organic biogas slurry bio-fertilizer on vegetable quality[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(8):75 -78. (in Chinese)

7 王忠江, 蔡康妮, 王丽丽,等. 施灌沼肥对土壤氨挥发和氮素下渗规律的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5):139 -144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20140522&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.022.
WANG Zhongjiang, CAI Kangni, WANG Lili, et al. Influence of biogas slurry application on ammonia volatilization and nitrogen infiltration[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):139 -144. (in Chinese)

8 DAUDEN A, QUILEZ D. Pig slurry versus mineral fertilization on corn yield and nitrate leaching in a Mediterranean irrigated environment[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21(1):7 -19.

9 杜臻杰, 齐学斌, 李平,等. 猪场废水灌溉对土壤氮素时空变化与氮平衡的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8):

262 – 269. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170830&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.030.
DU Zhenjie, QI Xuebin, LI Ping, et al. Effect of piggery wastewater irrigation on temporal-spatial variation and balance of nitrogen [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):262 – 269. (in Chinese)

10 LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2006, 11(2): 403 – 427.

11 吴昱, 赵雨森, 刘慧,等. 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 247 – 256. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170731&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.031.
WU Yu, ZHAO Yusen, LIU Hui, et al. Analysis and evaluation of influence of straw biochar on soil productivity of sloping land in black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):247 – 256. (in Chinese)

12 李发虎, 李明, 刘金泉,等. 生物炭对温室黄瓜根际土壤真菌丰度和根系生长的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4):265 – 270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170434&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.034.
LI Fahu, LI Ming, LIU Jinquan, et al. Effect of biochar on fungal abundance of rhizosphere soil and cucumber root growth in greenhouse[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):265 – 270. (in Chinese)

13 ATKINSON C J, FITZGERRALD J D, HIPPS N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review[J]. Plant & Soil, 2010, 337(1 – 2):1 – 18.

14 王欣, 尹带霞, 张凤,等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):248 – 257.
WANG Xin, YIN Daixia, ZHANG Feng, et al. Analysis of effect mechanism and risk of biochar on soil fertility and environmental quality[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 248 – 257. (in Chinese)

15 LAIRD D, FLEMING P, WANG B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3):436 – 442.

16 肖茜, 张洪培, 沈玉芳,等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16):128 – 134.
XIAO Qian, ZHANG Hongpei, SHEN Yufang, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 128 – 134. (in Chinese)

17 王宁, 焦晓燕, 武爱莲,等. 生物炭对土壤磷、钾养分影响研究进展[J]. 山西农业科学, 2016, 44(9):1402 – 1405.
WANG Ning, JIAO Xiaoyan, WU Ailian, et al. Research advances on effects of biochar application on soil phosphorus and potassium[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(9):1402 – 1405. (in Chinese)

18 武玉, 徐刚, 吕迎春,等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1):68 – 79.
WU Yu, XU Gang, LÜ Yingchun, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: current status and knowledge gaps[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1):68 – 79. (in Chinese)

19 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5):1 – 5.
GOU Mangmang, QU Zhongyi. Research on using biochar to agricultural soil amendment and crop yield[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2013(5):1 – 5. (in Chinese)

20 李江舟, 娄翼来, 张立猛,等. 不同生物炭添加量下植烟土壤养分的淋失[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4):1075 – 1080.
LI Jiangzhou, LOU Yilai, ZHANG Limeng, et al. Leaching loss of nutrients in tobacco-planting soil under different biochar adding levels[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4):1075 – 1080. (in Chinese)

21 刘强, 陈玲, 黄游,等. 施用污泥堆肥对土壤环境及高羊茅生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1):199 – 203.
LIU Qiang, CHEN Ling, HUANG You, et al. Effects of application of sewage sludge compost on soil environment and festuca arundinacea schreb[J]. Journal of Agro-Enviroment Science, 2009, 28(1):199 – 203. (in Chinese)

22 高德才, 张蕾, 刘强,等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6):54 – 61.
GAO Decai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 54 – 61. (in Chinese)

23 邢英, 李心清, 王兵,等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响:室内土柱模拟[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11):2483 – 2488.
XING Ying, LI Xinqing, WANG Bing, et al. Effects of biochar on soil nitrogen leaching: a laboratory simulation test with yellow soil column[J]. Chinese Journal of Ecology,2011, 30(11):2483 – 2488. (in Chinese)

24 刘玉学, 吕豪豪, 石岩,等. 生物质炭对土壤养分淋溶的影响及潜在机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):304 – 310.
LIU Yuxue, LÜ Haohao, SHI Yan, et al. Effects of biochar on soil nutrients leaching and potential mechanisms: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1):304 – 310. (in Chinese)

25 YAO Y, GAO B, ZHANG M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. Chemosphere, 2012, 89(11):1467 – 1471.

26 王耀锋, 刘玉学, 吕豪豪,等. 水洗生物炭配施化肥对水稻产量及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4):1049 – 1055.
WANG Yaofeng, LIU Yuxue, LÜ Haohao, et al. Effect of washing biochar and chemical fertilizers on rice yield and nutrient uptake[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4):1049 – 1055. (in Chinese)