

生物炭用量对模拟土柱氮素淋失和田间土壤水分参数的影响

陈心想, 何绪生, 张 雯, 耿增超

(西北农林科技大学资源环境学院, 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 利用土柱模拟试验和田间试验, 把由果树废枝干制备的生物炭以 0, 20, 40, 60 t·hm⁻² 和 80 t·hm⁻² 的用量施入土壤, 以探明不同用量的生物炭对土壤硝铵态氮素淋失和土壤水分的影响。结果表明, 施用生物炭可降低土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 累积淋溶量, 其中用量为 80 t·hm⁻² 处理较对照分别降低了 41% 和 18.6% ($P < 0.05$); NO₃⁻-N 淋溶主要集中在前三次, 其淋溶量占总量的 97.3% ~ 98.8%, 生物炭能增加 NO₃⁻-N 在土壤中的滞留时间, 延缓淋失; 在整个淋洗过程中, 氮素主要以 NO₃⁻-N 的形式淋失, 其累积淋溶量占 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 淋溶总量的 97.3% ~ 98.14%; 施用生物炭种植春玉米后, 土壤含水率和总孔隙度增加不显著。

关键词: 生物炭; 氮素淋失; NO₃⁻-N; NH₄⁺-N; 土壤水分

中图分类号: S158.3; S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)01-0110-05

Effects of quantity of biochar on nitrogen leaching in simulated soil columns and soil moisture parameters in field

CHEN Xin-xiang, HE Xu-sheng, ZHANG Wen, GENG Zeng-chao

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Using the simulation experiment in soil columns and field experiment, the different quantity of biochar prepared by the fruit tree branches as 0, 20, 40, 60 t·hm⁻² and 80 t·hm⁻² was applied to soil to search the impacts of different quantity of biochar on the nitrate nitrogen leaching and soil moisture. The results showed that after the biochar applied, the accumulative leaching amount of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in soil can be effectively reduced. Among them the treatment of 80 t·hm⁻² compared with the control, the NH₄⁺-N and NO₃⁻-N leaching was decreased 41% and 18.6% ($P < 0.05$), respectively. The leaching loss of NO₃⁻-N major occurred in the first three times, the leaching amount of NO₃⁻-N was accounted for 97.3% to 98.8% of the total leaching volume. The biochar can increase the retention time of NO₃⁻-N in soil, retard the leaching loss. In whole leaching process, the main form of nitrogen leaching loss was the NO₃⁻-N. Its accumulative leaching amount accounted for 97.3% to 98.14% of the total NO₃⁻-N and NH₄⁺-N leaching losses. After application of biochar to plant the spring maize, the increase of soil water content and soil total porosity was not notable.

Keywords: biochar; nitrogen leaching; nitrate nitrogen; ammonium nitrogen; soil moisture

氮素是植物生长必需的大量元素之一, 也是环境污染特别是地下水污染的重要来源。施入土壤的氮肥通过氨挥发、淋溶、径流、硝化-反硝化作用等途径损失, 降低了肥料利用率。旱地土壤的氮素利

用率为 40% ~ 60%, 施入的铵态或酰胺态 N 肥都会经过微生物硝化作用转变为硝态氮^[1], 过量施用氮肥会造成旱地土壤硝态氮大量累积^[2], 易随水向下迁移。调查发现, 在黄土高原地区 2 ~ 4 m 土壤中,

收稿日期: 2013-05-09

基金项目: 国家林业局“948”项目(2009-4-64); 国家农业部“948”项目(2010-Z19); 陕西省科技攻关项目(2010K02-12-1); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2010JM5004)

作者简介: 陈心想(1986—), 女, 山东苍山人, 硕士研究生, 主要从事废弃生物质资源化利用研究。E-mail: xinxiang20073975@163.com。

通信作者: 耿增超(1963—), 男, 陕西韩城人, 教授, 硕士生导师, 主要从事农林废弃物资源化利用及森林土壤研究。E-mail: gengzengchao@126.com。

高产农田的硝态氮累积量为 $214 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 一般农田亦可达到 $102 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其它农用地甚至高达 $1\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上^[3], 一般深层土壤反硝化过程微弱, 硝态氮很难转化为其他形态的氮, 很难被作物吸收利用而随土壤水分向下迁移, 构成对地下水污染的潜在威胁^[4]。

近年来, 生物炭(biochar)用作土壤改良剂以减少养分淋失的研究日益增多。由废弃生物质热裂解产生的生物炭比表面积大、吸附能力强, 可吸附水体和土壤中的氮、磷等物质^[5-6], 具有一定的保肥性能, 施入土壤可有效减少氮素的流失。研究表明, 在沙壤土中施用山核桃壳生物炭不仅能提高土壤 pH 值, 增加土壤有机碳、Ca、K、Mn、P 等含量, 还能减少土壤中 Ca、Mn、P 和 Zn 等的淋失^[7]。在施用有机肥的土壤中, 添加橡木和山核桃木生物炭能减少 N 和 P 的淋失量^[8]。在淋溶土及变性土中添加畜禽粪便和桉木生物炭, 能显著减少土壤中气态氮排放以及无机氮的淋溶损失^[9]。生物炭还可以吸附土壤有机分子, 从而可提高土壤养分吸持容量及持水容量^[10]。研究表明, 在富含黑炭的亚马逊土壤上, 田间持水量比周围无炭土壤增加了 18%^[11]。

为了研究生物炭对氮素在陕西关中地区塿土中的转移和对田间土壤水分的影响, 本研究通过室内模拟土柱淋洗和大田作物试验, 分析淋洗液中硝铵态氮的含量变化和土壤水分的变化, 为合理利用生物炭和提高氮肥利用率提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在西北农林科技大学试验田和室内分别进行, 供试土壤为塿土表层(0~20 cm)土壤, pH 值(1:2.5)为 8.11, 容重为 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 有机质含量为 $18.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量为 $18.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量为 $15.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。研究所用生物炭为陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司在裂解炉、限氧环境下(450°C)由废弃果树树干、枝条热裂解所得, pH 值(1:10)为 10.43, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量为 $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量为 $1.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 磨细过 1 mm 筛备用。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 模拟土柱淋洗生物炭用量为 5 个水平处理: B0($0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、B20($20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、B40($40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、B60($60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、B80($80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 其生物炭用量分别为 0、8.89、17.78、26.67、35.56 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土, 相当于田间试验用量 0、20、40、60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 80

$\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 每个处理设 3 次重复。

1.2.2 淋溶试验 生物炭与土壤混合均匀后, 将土壤分两层, 0~5 cm 为一层(土柱顶端为 0), 5~20 cm 为一层, 装入由 1 000 mL 塑料量筒改制的直径为 7.0 cm、高为 30.0 cm 的筒中, 底部淋洗出口处由打孔器打孔, 并安装移液枪头作为过滤嘴, 装土前筒底填放 2 层滤纸和几层纱布, 以防止土样颗粒流失。按照 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的田间容重将过 1 mm 筛的风干土样装入圆柱中, 形成约 20 cm 的模拟土柱(1 kg 干土)。肥料的加入方法是将 0~5 cm 的土壤与生物炭充分混匀后, 添加 0.217 g 的化学纯尿素混匀, 填装在土柱表面^[12], 其施用量相当于 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与陕西杨陵田间氮肥施用水平大致相当。安装土柱时, 特别注意将土柱壁边缘的土壤压实, 以确保无贴壁水流入渗, 尽量减少产生边缘效应。

管柱组装后, 注入去离子水 240 mL(土柱完全饱和且无渗漏液流出)并在室温下放置 3 d, 以使施入土壤的尿素完成铵化作用和硝化作用。之后每天用去离子水模拟降雨 40 mL, 折合降雨量为 10 mm, 下端接收淋溶液, 每 3 d 接一批, 共接 10 次, 并冷藏待测。

1.2.3 田间试验 于 2012 年 4 月 28 日至 8 月 21 日种植春玉米, 供试品种为正大 12, 小区面积为 $1.35 \times 3.5 \text{ m}^2$, 播种量为 $3\ 500 \text{ 株} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 各小区种植 4 行, 每行 6 株。各处理的氮、磷、钾肥(分别为尿素、磷酸二铵、硫酸钾)均作基肥施用, 用量为每公顷 225 kg N , $180 \text{ kg P}_2\text{O}_5$, $150 \text{ kg K}_2\text{O}$, 生物炭和肥料于种植前与耕层土壤混匀。在作物生长期根据天气及作物生长状况适量灌水, 以满足作物正常生长发育所需。

1.3 测定指标与方法

土壤和生物炭的基本理化性质参照《土壤农化分析》测定^[13]; 淋滤液 pH 值和电导率采用酸度计和电导率仪测定; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量采用流动分析仪测定; 土壤含水率和孔隙度采用环刀法测定^[14]。

1.4 数据处理

所有的试验数据利用 SPSS 17.0 统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 多重比较采用最小显著差异法(LSD), 显著性水平设定为 0.05, 用 Excel 2007 作图。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤淋溶液体积、pH 值及电导率的影响

由图 1 可见, 土柱中淋溶液的体积由小到大依

次为 B80 < B60 < B20 < B0 < B40, 但处理间无显著性差异。由此可知, 添加生物炭后, 土壤水分的淋失有降低趋势, 提高了土壤的持水性能, 这是由于生物炭疏松多孔, 比表面积大, 可以吸附较多水分, 提高土壤水分含量。

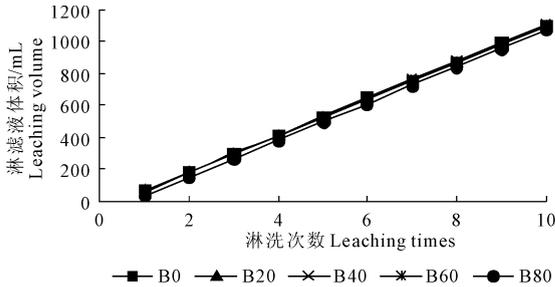


图 1 不同处理下土柱累积淋溶液体积

Fig. 1 Cumulative water leaching volume under different treatments

由图 2 可见, 随着淋滤次数的增加, pH 值和电导率呈先上升后下降趋势, 总体上随着生物炭用量的增加而增加, B80 淋洗液的 pH 值和电导率最高, 但处理间差异不显著。由于生物炭中灰分元素如 Ca、Mg、K、Na 等溶于水, 提高土壤的盐基饱和度从而提高土壤 pH 值, 在连续降雨时这些离子又随水流失, 提高淋滤液的电导率, 但无显著性差异, 其长期效应有待大田定位试验研究。

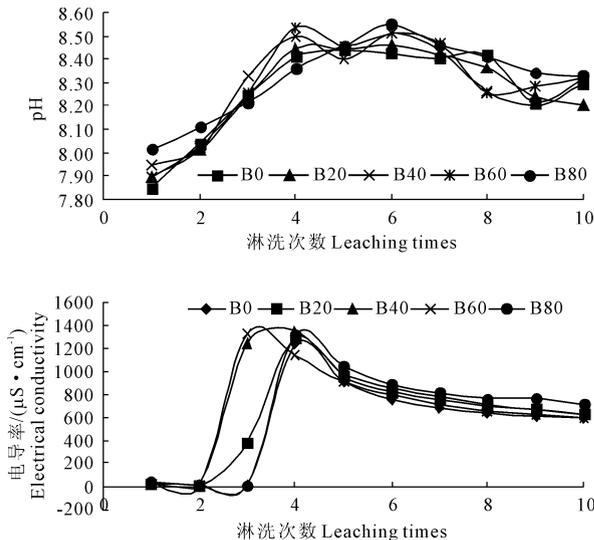


图 2 不同处理下淋溶液 pH 值和电导率的变化

Fig. 2 pH and electrical conductivity in leachate under different treatments

2.2 生物炭对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失量的影响

铵态氮易被土壤吸附, 在土壤中移动性差, 由图 3(a) 可知, 淋滤液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量呈先升高后降低趋势, 在第二次淋洗时达到最高, B0、B20、B40、B60、B80 土柱淋滤液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量分别为 2.27、

2.13、1.79、1.55 mg 和 1.48 mg, 随后淋滤液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量下降, 最后趋于稳定。由于加水平衡时间较短, 土壤中过量的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向下移动距离较短, 直到第二次淋洗时这些分布在水相中的氮素才淋洗完全, 而后淋洗出的可能是交换态的铵态氮^[15]。在整个淋洗过程中, 淋滤液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量随生物炭用量的增加而降低, B60 和 B80 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均含量显著低于 B0 ($P < 0.05$), 且 B60 < B80 ($P > 0.05$), 这是由于生物炭的吸附性能较强, 生物炭量的增加增强了土壤对铵态氮的吸附。

由图 3(b) 可知, 在连续降雨过程中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 累积淋溶量由小到大依次为 B80 < B60 < B40 < B20 < B0, 且 B80 较 B0 显著降低了 41% ($P < 0.05$), 表明随着生物炭用量的增加, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的淋溶损失逐渐降低, 而土壤对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸附能力在最高用量 ($80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 时显著提高。在淋溶初期, B40、B60 和 B80 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 累积淋溶量差异较小, 可能是由于生物炭与土壤作用时间较短, 交换吸附有一个时间过程, 因此, 这 3 个处理对土壤吸附 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的影响尚不明显。

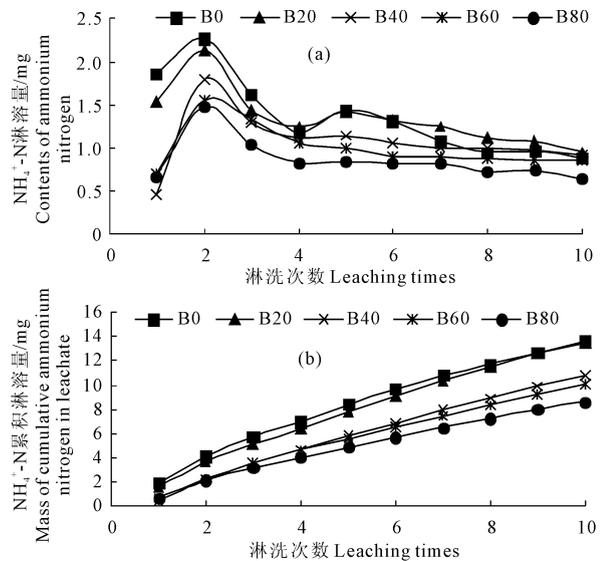


图 3 不同处理下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋溶量 (a) 和累积淋溶量 (b)

Fig. 3 Contents of ammonium nitrogen (a) and cumulative ammonium nitrogen (b) in leachate under different treatments

2.3 生物炭对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量的影响

由图 4(a) 可知, 在整个淋洗过程中, 淋滤液中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量呈降低趋势, 最终达到稳定。仅 B80 在第二次淋洗时 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量达到最高为 226.93 mg, 而 B0、B20、B40 和 B60 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量峰值分别为 356.19、408.18、419.51 mg 和 416.55 mg。各处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶主要集中在前三次, B0、B20、B40、

B60 和 B80 前三次淋溶量分别占淋溶总量的 97.3%、97.3%、98.3%、98.8% 和 98.0%。但第一次淋滤液中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量 $\text{B80} < \text{B0}$, 第二次 $\text{B80} > \text{B0}$, 这表明添加 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的生物炭能增加 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在土壤中的滞留时间, 延缓淋失。

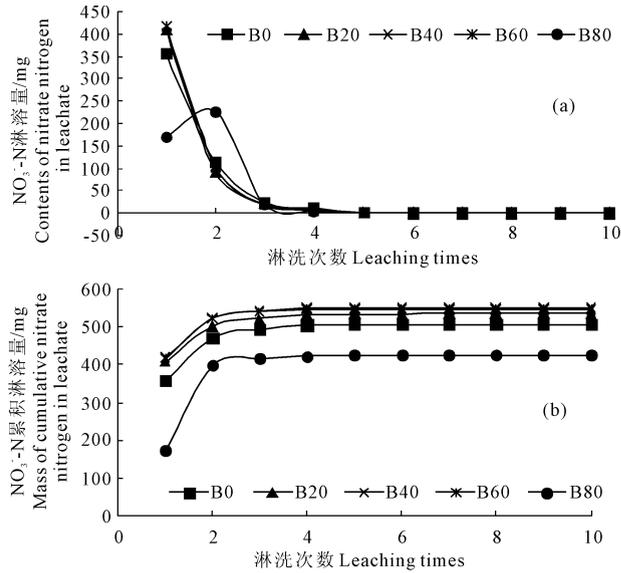


图 4 不同处理下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶量(a)和累积淋溶量(b)
Fig.4 Contents of nitrate nitrogen(a) and cumulative nitrate nitrogen(b) in leachate under different treatments

由图 4(b)可知,在整个淋洗过程中,生物炭用量为 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时土柱累积 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶量最低,为 395.5 mg ,依次为 B0(486.1 mg)、B20(517.2 mg)、B60(529.2 mg)和 B40(533.9 mg)。仅 B80 较其他处理显著降低 ($P < 0.05$),较对照降低了 18.6% ,且 B20、B60 和 B40 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积淋溶量均高于 B0,但差异不显著。这可能是由于生物炭的孔隙结构发达,具有多孔性,且孔隙大小不一,施入土壤后引起土壤孔隙发生变化,通透性增加,造成短期内土柱土层疏松,促进了硝态氮的淋失,而施用量达到 $80 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时生物炭对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的吸附作用较强而抑制了其淋失。在整个淋洗过程中,由于时间较长,铵

态氮素可能发生硝化-反硝化作用引起损失,氮素主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的形式淋失, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积淋溶量占 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋溶总量的 $97.3\% \sim 98.1\%$ 。

2.4 氮素淋溶量与水化学参数之间的相关性

由表 1 可知,淋滤液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 pH 值呈显著负相关关系,是由于生物炭本身阳离子交换量大,且该生物炭含有大量阳离子,易与土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 交换而促进土壤对其吸附,进而抑制其随水流失,但此结果与前人研究相悖^[26]。淋滤液中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与淋滤液体积呈显著正相关关系,表明 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失主要与降雨量有关。

表 1 淋滤液中氮淋溶量与水化学参数的相关矩阵

Table 1 Correlative matrix of water chemical parameters of nitrogen leaching in leachate

	体积 Volume	EC	pH	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$
体积 Volume	1	0.049	-0.882*	0.644	0.930*
EC		1	0.360	-0.678	0.366
pH			1	-0.924*	-0.68
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$				1	0.358
$\text{NO}_3^- - \text{N}$					1

注: $n = 5$, * $P < 0.05$, 其中 EC、pH 为 10 次淋滤液的平均值, 体积、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 10 次累积淋失量的平均值。

Note: $n = 5$, * $P < 0.05$ the data of EC and pH is average value of ten times leachate, the data of volume, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ is average value of the cumulative amount in ten times leachate.

2.5 生物炭对田间土壤水分参数的影响

土壤水分含量及其有效性是衡量土壤生产力的重要指标之一,而生物炭可以吸附和保持水分,并且增强土壤水分的渗透性^[16]。由表 2 可知,随着生物炭用量的增加,种植春玉米后土壤含水率和总孔隙度均有增加趋势,在该试验最高用量时达到最大,但处理间差异均不显著,此结果与土柱模拟试验结果一致,可能是由于试验时间较短,生物炭对土壤的影响尚不显著,其长期效应有待田间试验进一步研究。

表 2 生物炭对大田土壤水分的影响

Table 2 Effects of biochar to the soil moisture in field

处理 Treatment	田间持水量/% Field capacity	饱和持水量/% Saturation moisture content	毛管持水量/% Capillary water capacity	总孔隙度% Total porosity
B0	$22.09 \pm 1.77\text{a}$	$32.50 \pm 0.13\text{a}$	$24.30 \pm 1.47\text{a}$	$4.60 \pm 1.48\text{a}$
B20	$23.17 \pm 1.10\text{a}$	$32.99 \pm 0.12\text{a}$	$24.56 \pm 0.82\text{a}$	$4.68 \pm 1.06\text{a}$
B40	$24.00 \pm 0.39\text{a}$	$34.25 \pm 0.08\text{a}$	$24.83 \pm 1.71\text{a}$	$4.72 \pm 0.52\text{a}$
B60	$25.18 \pm 1.35\text{a}$	$36.83 \pm 0.10\text{a}$	$26.86 \pm 2.02\text{a}$	$4.84 \pm 1.31\text{a}$
B80	$25.13 \pm 0.57\text{a}$	$37.18 \pm 0.09\text{a}$	$27.26 \pm 1.35\text{a}$	$4.91 \pm 0.39\text{a}$

注:同列不同小写字母表示 $P < 0.05$ 差异显著性水平,“±”后数字表示标准误差。

Note: Different small letters indicate significant difference at $P < 0.05$ level in same row; the data after “±” represent standard error.

3 讨论

生物炭对土壤物理性质,如田间持水量、容重的影响,一方面取决于土壤质地,另一方面还取决于生物炭比表面积、施用量等。由于生物炭是多孔性材料,具有一定的吸水倍率,可增加土壤吸水量^[17]。而且生物炭的孔隙结构使其比表面积大、容重小,施入土壤后改变原土壤的孔隙状况,从而增加土壤孔隙度,提高土壤的持水能力,随着生物炭用量的增多,对原土壤孔隙状况的影响增强,对土壤持水量的改变也愈大。本研究结果与前人研究结果一致^[18]。

第一次淋洗时,土壤中的酸性物质因淋水强度较大而淋出土柱,故各处理淋滤液 pH 值较低。随着土壤中的可溶酸性物质被淋出土柱,尿素水解需要消耗土壤中 H^+ ^[19],且本研究所用生物炭呈碱性,施入土壤后其含有的灰分元素溶于水后提高土壤 pH 值,因而各处理淋滤液的 pH 值呈上升趋势,而后随着淋洗强度的增大而逐渐下降,这可能与试验条件和时间有关,具体效应有待田间试验继续研究。

生物炭施入土壤后通过提高土壤有机碳含量,改善土壤保水、保肥性能^[20],从而减少养分损失。生物炭比表面积大,多孔结构复杂,施入土壤后既可通过物理吸附作用吸附 $NH_4^+ - N$,又通过改善土壤通气状况抑制微生物反硝化作用,以抑制氮氧化物的排放^[21]。另一方面,生物炭表面具有大量负电荷及高电荷密度的特性^[22],同时具有正、负电荷,能吸附固定水、土壤或沉积物中极性或非极性有机化合物^[23-24]以及无机离子如 NH_4^+ 、 NO_3^- 等。前人指出,在多层土柱表层土壤施加 0.5% 竹炭后,可阻碍 $NH_4^+ - N$ 向下传输,减少 $NH_4^+ - N$ 淋失量^[25]。

受土壤温度影响,尿素在土壤生物酶作用下一般需 5~7 d 左右即转化为 $NH_4^+ - N$ ^[26],所以本研究的淋滤液中 $NH_4^+ - N$ 含量峰值出现在第二次淋洗时,但 $NH_4^+ - N$ 在整个淋滤试验过程中所占比例较小,说明尿素中氮素大部分在生物酶的作用下转化为 $NO_3^- - N$ 被淋失。

B80(80 t·hm⁻²)淋滤液中 $NO_3^- - N$ 累计淋溶量显著小于 B0,其他处理在统计上与 B0 无显著性差异,说明在土壤中添加此量的生物炭对 $NO_3^- - N$ 有吸附、保蓄作用,可减少 $NO_3^- - N$ 淋失,提高其在土壤中的存留时间和保存量,增大其被作物利用的机率^[27]。这与前人报道的生物炭施用量在 50 t·hm⁻² 以上时能大幅度地降低土壤中氮素的淋失作用^[28]一致。虽然生物炭中含有一定量 $NH_4^+ - N$ 和

$NO_3^- - N$,溶于水后可能增加其在淋溶初期的淋失量,但随着生物炭用量的增加带入的 $NH_4^+ - N$ 和 $NO_3^- - N$ 量也随之增加,但累积淋溶量变化趋势并未发生显著变化,表明生物炭的养分含量较低,对氮素淋溶的影响较小,主要是通过改善土壤理化性质而抑制氮素淋洗。

4 结论

施用生物炭后,土壤 $NH_4^+ - N$ 和 $NO_3^- - N$ 累积淋溶量降低,其中用量为 80 t·hm⁻² 处理较对照分别降低了 41% 和 18.6% ($P < 0.05$); $NO_3^- - N$ 淋溶主要集中在前三次,其淋溶量占总量的 97.3%~98.8%,添加 80 t·hm⁻² 的生物炭可以显著增加 $NO_3^- - N$ 在土壤中的贮存时间,延缓淋失。在整个淋洗过程中,氮素主要以 $NO_3^- - N$ 的形式淋失,其累积淋溶量占 $NO_3^- - N$ 、 $NH_4^+ - N$ 淋溶总量的 97.3%~98.14%。田间土壤含水率和土壤孔隙度随生物炭用量的增加而增加,但差异均不显著。生物炭对土壤性质的影响受多种因素的影响,其具体效应有待长期大田试验进一步研究。

参考文献:

- [1] 王朝辉,李生秀,王西娜,等.旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究[J].土壤,2006,38(6):676-681.
- [2] 杨玉惠,张仁陟.氮肥施用对黄土高原中部雨养农业区土壤硝态氮分布与累积的影响[J].土壤通报,2007,38(4):672-676.
- [3] 吕殿青,同延安,孙本华,等.氮肥施用对环境污染影响的研究[J].植物营养与肥料学报,1998,4(1):8-15.
- [4] 串丽敏,赵同科,安志装,等.土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J].中国农学通报,2010,26(11):200-205.
- [5] Lehmann J, Da Silva J P, Rondon M, et al. Slash-and-char: A feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon? [C]//Soil Science: Confronting new realities in the 21st century. Bangkok: 17th World Congress of Soil Science, 2002:1-12.
- [6] 张慧,代静玉,李辉信.炭化秸秆对水体中氨氮和磷的吸附性能及其与粉煤灰和炉渣的对比[J].农业环境科学学报,2009,28(11):2389-2394.
- [7] Novak K M Bus, Scher W J, Laird D L, et al. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern Coastal Plain soil [J]. Soil Science, 2009,174(2):105-112.
- [8] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010,158(3/4):436-442.
- [9] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils [J]. Journal of Environment Quality, 2010,39(4):1224-1235.

- 5228.
- [6] 陈强龙,谷洁,高华,等. 秸秆还田对土壤脱氢酶和多酚氧化酶活性动态变化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 146-151.
- [7] 杨志新,刘树庆. 重金属 Cd、Zn、Pb 复合污染对土壤酶活性的影响[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 60-63.
- [8] Peters D P, Gosz J R, Pockman W T, et al. Integrating patch and boundary dynamics to understand and predict biotic transitions at multiple scales[J]. *Landscape Ecology*, 2006, 21: 19-33.
- [9] Bowersox M A, Brown D G. Measuring the abruptness of patchy ecotones[J]. *Landscape Ecology*, 2001, 156: 89-103.
- [10] 周洪华,陈亚宁,李卫红. 塔里木河下游绿洲-荒漠过渡带植物多样性特征及优势种群分布格局[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 688-696.
- [11] 郭明,李新. 基于遥感和 GIS 绿洲发育适度规模分析—以酒泉绿洲为例[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(4): 312-316.
- [12] 罗格平,周成虎,陈曦,等. 区域尺度绿洲稳定性评价[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4): 519-524.
- [13] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [14] 杨兰芳,曾巧,李海波,等. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 207-210.
- [15] 漆良华,张旭东,彭镇华. 湘西北小流域植被恢复区土壤酶活性及养分相关性[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(3): 83-88.
- [16] 耿玉清,白翠霞,赵广亮,等. 土壤磷酸酶活性及其与有机磷组分的相关性[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 139-143.
- [17] 王荫槐. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992: 183-184.
- [18] 薛立,邝立刚,陈红跃,等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 280-285.
- [19] 苗琳,王立,黄高宝,等. 保护性耕作对旱地麦田土壤酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 6-11.
- [20] 张刘东,李传荣,孙明高,等. 沿海破坏山体周边不同植被恢复模式的土壤酶活性[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 112-116.
- [21] Badiane N N Y, Chotte J L, Patea E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18: 229-238.
- [22] 徐凌飞,韩清芳,吴中营,等. 清耕和生草梨园土壤酶活性的空间变化[J]. 中国农业科学, 2010, 43(23): 4977-4982.
- [23] 董莉丽,郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区植被类型对土壤质量的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 616-621.
- [24] 李慧杰,徐福利,林云,等. 施用氮磷钾对黄土丘陵区山地红枣林土壤酶与土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 53-59.
- [25] 曹伟鹏,吴发启,雷金银,等. 毛乌素沙地南缘不同耕作措施土壤酶和微生物区系的特征[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 88-95.

(上接第 114 页)

- [10] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 403-427.
- [11] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoals: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [12] 沈仁芳,赵其国. 红壤土柱中营养元素的淋失. II. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失[J]. 土壤, 1995, (4): 178-181.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [14] 中国科学院土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 上海: 中国科学出版社, 1978: 108-119.
- [15] 刘玮晶,刘焯,高晓荔,等. 外源生物炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5): 962-968.
- [16] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: soil physical properties, leaf SPAD and grain yield[J]. *Field Crop Research*, 2009, 111: 81-84.
- [17] 高海英,何绪生,耿增超,等. 生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(24): 207-213.
- [18] 黄超,刘丽君,章明奎. 生物炭对红壤性质和燕麦草生长的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(4): 439-445.
- [19] 蒋朝晖,曾清如,方至,等. 不同温度下施入尿素后土壤短期内 pH 的变化和氨气释放特性[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 299-302.
- [20] 何绪生,张树清,余雕,等. 生物炭对土壤肥料的作用及未来研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27(15): 16-25.
- [21] Lehmann J, Da Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [22] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate K, et al. Removal of nitrate nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 255-257.
- [23] Smernik R J, Kookana R S, Skjemstad J O. NMR characterization of ^{13}C -benzene sorbed to natural and prepared charcoals[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(6): 1764-1769.
- [24] Kwon S, Pignatello J J. Effect of natural organics substances on the surface and adsorptive properties of environmental black carbon (char): Pseudo pore block age by model lipid components and its implications for N_2 -probed surface properties of natural sorbents[J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(20): 7932-7939.
- [25] Ding Ying, Liu Yu-xue, Wu Wei-xiang, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2010, 213: 47-55.
- [26] 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.
- [27] Kameyama K, Miyamoto T, Shiono T, et al. Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcareous dark red soil[J]. *Journal of Environment Quality*, 2012, 41(4): 1131-1137.
- [28] 周志红,李心清,邢英,等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 278-284.