

玉米秸秆生物质炭对硝态氮在土壤中迁移与滞留的影响^①

王 展, 范庆锋, 许秋爽, 李雪瑶, 卢锦钰, 张玉龙, 邹洪涛*

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘 要: 为了探究玉米秸秆生物质炭对硝态氮在土壤中迁移规律和滞留特征的影响, 本研究以东北地区棕壤和黑土为供试土壤, 向土壤中添加不同比例的玉米秸秆生物质炭(添加比例为 1%、5%、10%), 利用土柱淋洗试验模拟硝态氮在不同玉米秸秆生物质炭添加土壤中的淋洗过程。分别测定渗滤液体积, 渗滤液中硝态氮的含量以及硝态氮在土柱中的垂直分布。结果表明: 土壤中添加玉米秸秆生物质炭显著影响渗滤液流出总量和土壤渗透系数, 二者均随生物质炭的增加而减少。土壤中硝态氮流出量随淋洗时间的增加先增加, 然后减少, 最后逐渐趋于稳定(除了棕壤添加生物质炭 10% 处理, 黑土添加生物质炭 5% 和 10% 处理)。相同比例玉米秸秆生物质炭添加条件下, 棕壤中硝态氮的流出总量远高于黑土中硝态氮的流出总量。硝态氮流出总量与渗滤液体积和土壤渗透系数极显著正相关。淋洗试验后部分硝态氮滞留在土壤中, 棕壤中添加玉米秸秆生物质炭后, 大部分硝态氮被上层土壤截留, 硝态氮比例呈现上高下低的变化趋势; 而黑土中添加生物质炭对硝态氮在各层土壤中的分布未见明显影响。研究表明, 玉米秸秆生物质炭添加到土壤中能够显著降低土壤的渗透性, 阻碍水分的迁移, 降低硝态氮在土壤中的淋失风险, 对于提高氮素利用率和保护环境具有重要意义。

关键词: 玉米秸秆生物质炭; 硝态氮; 土壤; 迁移; 滞留

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Effects of Corn-straw Biochar on Migration and Retention of Nitrate Nitrogen in Soil

WANG Zhan, FAN Qingfeng, XU Qiushuang, LI Xueyao, LU Jinyu, ZHANG Yulong, ZOU Hongtao*

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to explore the effects of corn-straw biochar on the migration and retention characteristics of nitrate nitrogen in soil, this study selected brown soil and black soil in Northeast China as tested materials, different proportions of corn-straw biochar (1%, 5%, and 10%) were added to soils for a soil column leaching test to simulate the leaching process of nitrate nitrogen in soils, the volume of leachate, the content of nitrate nitrogen in leachate and the vertical distribution of nitrate nitrogen in soil columns were measured. The results showed that biochar significantly affected the total leachate outflow and soil permeability coefficient, both decreased with the increase of biochar addition. With the increase of leaching time, the outflow of nitrate nitrogen in soil first increased, then decreased, and finally gradually stabilized (except for brown soil added with 10% of biochar, black soil added with 5% and 10% of biochar). Under the same ratio of biochar addition, the total amount of nitrate nitrogen outflowed from brown soil was much higher than that from black soil. The total amount of nitrate nitrogen outflow was positively correlated with leachate volume and soil permeability coefficient. After the leaching test, part of nitrate nitrogen remained in the soil, for brown soil with biochar added, most of nitrate nitrogen was trapped in the upper soil, nitrate nitrogen content showed a trend of higher in the top layer and lower in bottom layer, but for the black soil with biochar added, not significant affect was observed in the distribution of nitrate nitrogen in different layers. In conclusion, the addition of corn-straw biochar can significantly reduce soil permeability, hinder water migration, and reduce the risk of nitrate nitrogen leaching in soil, which is of great significance for improving nitrogen utilization and protecting environment.

Key words: Corn-straw biochar; Nitrate nitrogen; Soil; Migration; Retention

①基金项目: 辽宁省教育厅面上项目(LJKZ0663)和国家重点研发计划项目(2023YFD1501102)资助。

* 通信作者(zht@syau.edu.cn)

作者简介: 王展(1979—), 女, 辽宁瓦房店人, 博士, 副教授, 主要从事土壤中污染物迁移过程研究。E-mail: zhanwang@syau.edu.cn

氮肥是目前我国农业生产中施用量最大的肥料之一，与 20 世纪 60 年代相比，21 世纪初的氮肥使用量增加了 6 倍，据报道 2021 年我国农用氮肥使用量达到 1 745.3 万 t^[1]。而投入的氮肥，仅有 30%~35% 被农作物吸收利用^[2-3]，导致大量未被作物利用的氮肥在土壤中积累^[4]。氮肥随灌溉水施入土壤的过程^[5]，或积累在土壤中的氮肥在灌溉和降水的影响下，都会发生氮素淋失作用，而硝态氮淋失被认为是旱地农田氮素损失的主要途径之一^[6-8]，同时也是造成水体硝态氮污染的重要原因之一。因此改良土壤管理措施，减少氮素淋溶损失、提高土壤对硝态氮的固持能力是提高氮素利用率和降低环境污染风险的重要途径^[7, 9]。

生物质炭是由生物质在缺氧或厌氧条件下高温裂解而成的固体物质^[10]，可以作为改良剂施入土壤^[11-14]，并减少氮素淋失^[15]。由于其表面积大且含有丰富的官能团，具有较强的吸附能力^[16-17]，能有效提高土壤对养分的吸持能力，并且通过土壤孔隙中滞留水分而实现养分的保留，使土壤氮素得到固定。研究表明，当生物质炭添加质量百分数达到一定比例时可显著降低土壤中硝态氮淋洗量^[9, 18]，且随着生物质炭使用量不断增加，土壤淋溶液中硝态氮浓度不断降低^[18]。生物质炭对土壤中硝态氮淋洗的具体影响效果与生物质炭种类和土壤类型有关^[19-22]。如王冰等^[21]研究发现，不同类型生物质炭对黑土中硝态氮淋失量的影响

表现为玉米秸秆>稻壳>松木生物质炭。Cui 等^[22]研究发现，与农田土壤相比，湿地土壤中粘粒含量高会削弱矿物负载生物质炭对硝态氮淋失量减少的潜力。李文娟等^[20]发现，生物质炭能够降低质地较粗的黄绵土和风沙土中硝态氮的淋失，但是促进质地较为黏细的壤土中硝态氮的淋失。

东北是我国玉米的主产区，玉米秸秆作为主要的农业生物质废弃物，其资源化利用也受到广泛关注。近年来，我国东北粮食产区逐渐开始采用生物质炭改良土壤，缓解土壤的氮素流失问题^[23]。本研究以东北地区典型土壤类型棕壤和黑土为供试土壤，开展室内土柱模拟淋洗试验，研究硝态氮在添加不同比例玉米秸秆生物质炭土壤中的迁移规律及滞留特征，分析生物质炭对两种土壤固持硝态氮能力的影响效果，以期利用玉米秸秆生物质炭改良农田土壤，阻控氮素流失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和生物质炭

供试土壤棕壤和黑土采样时间为 2023 年 3 月，采样地点为辽宁省沈阳市沈阳农业大学试验地(41°82'N, 123°57'E)和黑龙江省哈尔滨市宾县宾州镇农业技术推广中心试验地(45°77'N, 124°50'E)。采样深度为 0~10 cm，去除植物残体、砂石，自然风干后过 1 mm 筛，室温下保存。土壤理化性质列于表 1。

表 1 土壤的理化性质
Table 1 Tested soil physiochemical properties

土壤类型	pH	容重 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	砂粒含量 (%)	粉粒含量 (%)	黏粒含量 (%)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	硝态氮 (mg/kg)	铵态氮 (mg/kg)
棕壤	5.7	1.36	0.49	42	28	30	22.8	1.29	10.6	1.56
黑土	5.9	1.29	0.51	52.3	30	17.7	29.8	1.65	45.62	22.71

供试生物质炭为玉米秸秆生物质炭，粒径<60 目。玉米秸秆生物质炭的 pH 10.36，总碳 542.1 g/kg，总氮 25.6 g/kg。采用场发射扫描电子显微镜(日立 S4800 bet，日本)测定生物质炭的微观结构(图 1)。

1.2 土柱淋洗试验

采用内径 4.5 cm，高 14.5 cm 的 PVC 管作为土柱淋洗试验装置。将生物质炭与一定量的棕壤或黑土充分混匀(生物质炭的添加比例为 0、1%、5%、10%(w/w，质量比)，按照土壤容重装填土柱，土层高度为 10 cm。棕壤填装的土柱记为：ZC0、ZC1、ZC5 和 ZC10，黑土填装的土柱记为：HC0、HC1、HC5 和 HC10，本研究共 8 个处理，每个处理重复

3 次。

淋洗试验前先使土柱内土壤水分饱和，然后采用 0.01 mol/L 的 NaNO₃ 作为淋洗液进行淋洗试验。试验过程始终控制水头高度为 2.5 cm。每 30 min 收集 1 次渗滤液，并记录其体积。淋洗试验共持续 480 min。具体试验装置结构如图 2 所示。

1.3 土壤渗透系数的计算

土壤渗透系数计算公式如下^[9]：

$$K = \frac{QL}{AHt}$$

(1)

式中：K 为土壤渗透系数(cm/min)；Q 为 480 min 土柱渗滤液流出量(mL)；L 为土层的厚度(cm)；A 为土

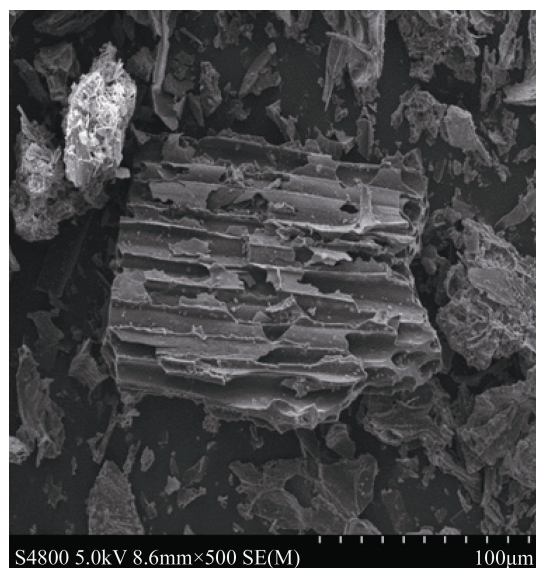


图 1 生物质炭的扫描电镜图($\times 500$ 倍)

Fig.1 Scanning electron microscope of biochar tested($\times 500$ times)

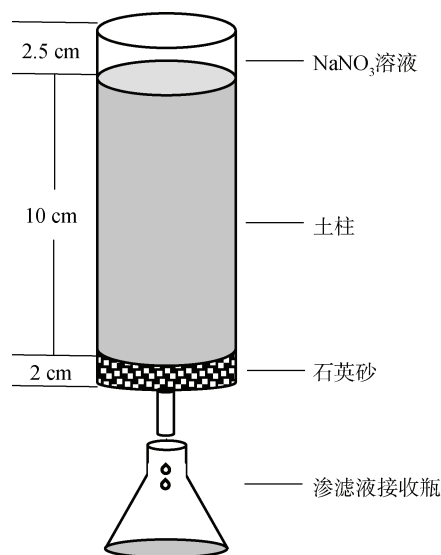


图 2 淋溶装置结构

Fig. 2 Structure of leaching device

柱的横截面积(cm^2); H 为恒定水头高度(cm); t 为渗滤液流经时间(min)。

1.4 渗滤液中硝态氮的测定

采用流动分析仪(AA3, 天津中通科技发展有限公司), 测定渗滤液中硝态氮的含量^[18]。

1.5 土壤样品的测定

土柱淋溶试验结束后, 将土柱中的土壤平均分为五层取出, 自然风干。称取自然风干的土样 5.00 g 置于离心管中, 向离心管中加入 50 mL 0.01 mol/L 的 CaCl_2 溶液并摇匀, 以 180 r/min 振荡 30 min 后, 将溶液过滤。采用 AA3 流动分析仪测定溶液中硝态氮的含量^[18], 并计算每层土壤中硝态氮的含量。

1.6 数据处理

采用 SPSS 16.0 对试验数据进行不同处理之间的方差分析和多重比较分析, 采用 Origin 2022 画图。

2 结果与讨论

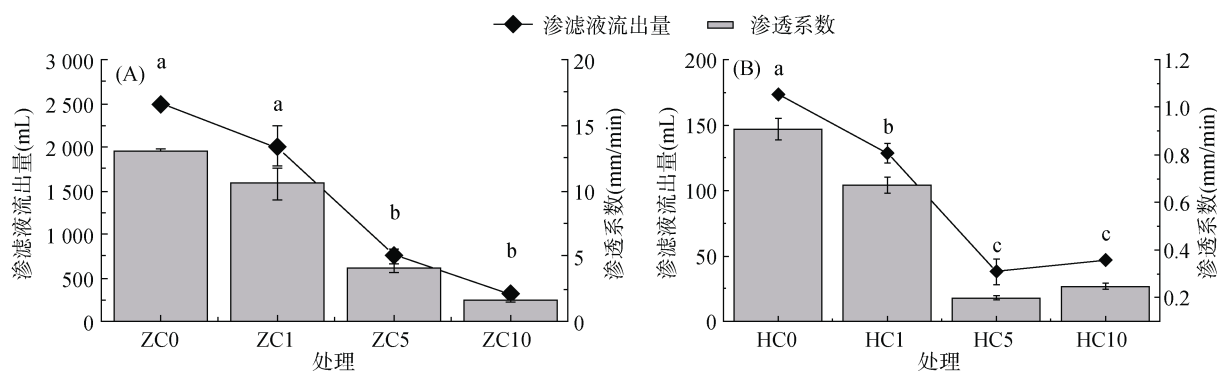
2.1 玉米秸秆生物质炭对土壤渗透性的影响

图 3 为添加不同比例玉米秸秆生物质炭土壤淋洗试验过程总的渗滤液流出量和渗透系数。从图中可以看出两种土壤的渗滤液流出量和渗透系数均随玉米秸秆生物质炭的增加而减少, 说明添加玉米秸秆生物质炭可以有效降低棕壤和黑土的渗透性, 阻碍水分向下迁移淋失。刘岑薇等^[19]和靖彦等^[24]向红壤中添加小麦秸秆生物质炭, 王燕等^[25]向砂壤中添加玉米秸秆生物质炭, 纪文婕^[26]向农田土壤中添加纳米生物质炭, 余辉等^[27]向石灰土中加入秸秆生物质炭, 都得到了类似的研究结果。因为生物质炭面极性官能团较多, 亲水性较强, 有更大的截留水的潜力^[24]。而且生物质炭颗粒细小且表面多孔, 孔隙内表面产生的张力较大, 可提高土壤对水分的吸持能力^[6,24,27-28]。此外, 当细小颗粒的生物质炭与土壤混合后能够阻塞土壤中的大孔隙, 降低孔隙间的连通性, 使土壤的孔隙变小, 从而使土壤中水分运动的通道变得曲折复杂, 土壤水分入渗受到控制作用^[28]。但是当土壤质地比较黏重时, 施入一定比例的生物质炭后, 可使土壤颗粒之间孔隙的尺寸和连通性增大, 从而增强土壤的渗透性^[10]。

添加不同比例生物质炭后, 棕壤的渗滤液流出量和渗透系数均大于黑土, 说明棕壤的渗透性强于黑土。玉米秸秆生物质炭添加量对土壤渗滤液流出量和渗透系数的影响在两种土壤上的表现不同(图 3)。棕壤中添加玉米秸秆生物质炭 $\geq 5\%$ 显著降低了土壤的渗滤液流出量和渗透系数。黑土中添加玉米秸秆生物质炭 $\geq 1\%$ 即可显著降低土壤的渗滤液流出量和渗透系数。肖茜等^[29]的研究也发现生物质炭添加对不同类型土壤(黄绵土、黑垆土、风沙土)入渗过程的影响不同。但当玉米秸秆生物质炭添加量达到 10% 时, 无论是棕壤还是黑土, 土壤渗滤液流出量和渗透系数均不再显著降低。

2.2 玉米秸秆生物质炭对土壤中硝态氮迁移的影响

土壤中硝态氮流出量随淋洗时间的增加先增加, 然后减少, 最后逐渐趋于稳定(除了 ZC10, HC5 和 HC10)(图 4)。淋洗开始的时期随着渗滤液体积的增加, 硝态氮的淋出量也逐渐增加。一方面淋洗液中的硝态氮会被土壤胶体或/和生物质炭吸附^[29-30], 另一



(土壤的渗滤液流出量和渗透系数的多重比较结果相同,不同小写字母表示同一土壤不同处理之间差异显著($P<0.05$)).下同)

图3 不同处理下棕壤(A)和黑土(B)的渗滤液流出量和渗透系数

Fig. 3 Permeability coefficients and leachate outflows from brown soil (A) and black soil (B) under different treatments

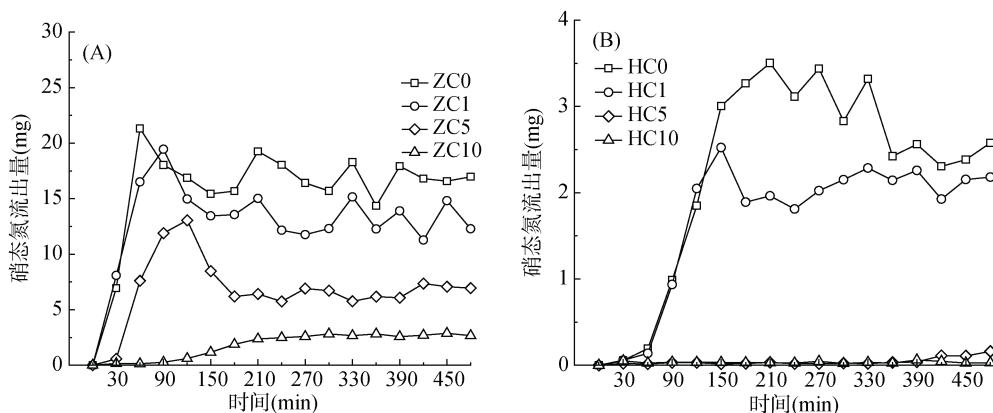


图4 不同生物质炭添加量棕壤(A)和黑土(B)的硝态氮流出量

Fig. 4 Nitrate nitrogen outflows from brown soil (A) and black soil (B) under different amounts of biochar added

方面土壤中的硝态氮会解吸至土壤溶液中^[28],因此渗滤液中硝态氮的含量是上述两个过程综合作用的结果。随着淋洗时间的延长,土壤解吸的硝态氮逐渐减少,而淋洗液中的硝态氮在土壤胶体上的吸附也达到平衡。但是当土壤中生物质炭含量较高会导致其对硝态氮的吸附量显著增加,而渗滤液的流出量显著降低,硝态氮流出量在淋洗时间较长时才表现出逐渐增加并趋于平稳的趋势(ZC10, HC5 和 HC10)。

施加玉米秸秆生物质炭能够显著降低土壤中硝态氮的淋失,土壤中硝态氮流出总量随着玉米秸秆生物质炭添加比例增加而降低(图5)。棕壤中添加1%、5%和10%的玉米秸秆生物质炭,土柱中硝态氮的流出总量分别降低了16.36%、56.36%和88.29%(图5A);黑土中添加1%、5%和10%的玉米秸秆生物质炭,土柱中硝态氮的流出总量分别降低了24.92%、98.13%和98.59%(图5B)。一方面生物质炭的添加降低了水分的流失量(图3B),减少了硝态氮随水分淋失的风险;另一方面生物质炭的添加增加了土壤对硝态氮的吸附^[21];此外生物质炭的孔隙结构能够为微生物提供生活场所,通过活性官能团和静电吸附养分

离子而对硝酸根产生吸附作用^[19]。因此生物质炭的添加导致更多的硝态氮滞留在土壤中,显著提高了土壤对硝态氮的保持能力。高德才等^[8]、靖彦等^[24]、盖霞普等^[31]的研究也得到了类似的结果。

玉米秸秆生物质炭添加量对于降低棕壤和黑土中硝态氮淋失的作用效果不同。生物质炭添加量 $\geq 5\%$ 才能够显著降低棕壤硝态氮流出总量。而生物质炭添加量1%即可显著降低黑土的硝态氮流出总量。当生物质炭添加量大于5%时,无论是棕壤还是黑土,土壤中硝态氮流出总量均不再显著降低。高德才等^[8]向红壤中添加秸秆生物质炭时,发现生物质炭在土壤中添加比例达2%及以上时,才能显著减少硝态氮淋失。可见添加生物质炭改良土壤,要根据不同土壤类型选择生物质炭的添加量。

在相同比例玉米秸秆生物质炭添加量的土壤中,棕壤中硝态氮的出流量远高于黑土中硝态氮的出流量,因为棕壤的渗透性和渗滤液流出量高于黑土的渗透性和渗滤液流出量,土壤初始特征对硝态氮的淋溶行为存在较大影响^[26]。表2为不同玉米秸秆生物质炭添加量土壤硝态氮流出总量、渗滤液体积和渗透系

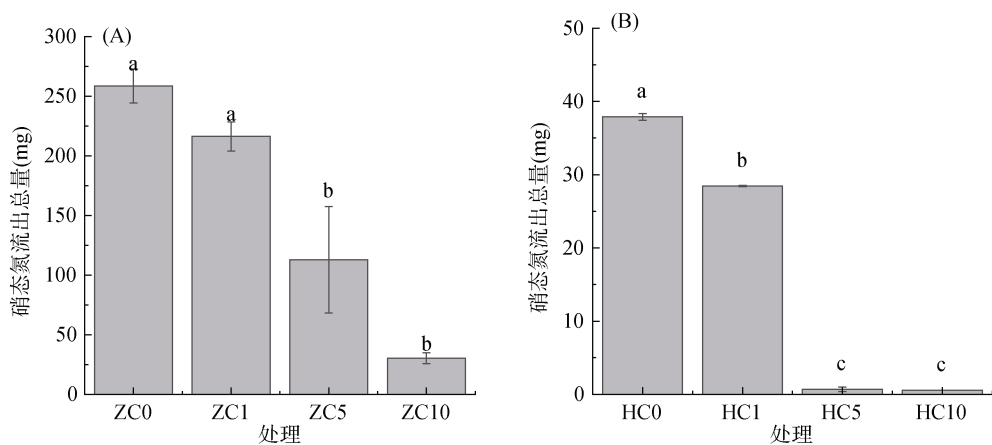


图 5 不同处理棕壤(A)和黑土(B)的硝态氮流出总量
Fig. 5 Accumulated outflows of soil nitrate nitrogen under different treatments from brown soil (A) and black soil (B)

数的相关性分析。从表 2 可知,硝态氮流出总量与渗滤液体积和土壤渗透系数均极显著正相关($P<0.01$),渗滤液体积和土壤渗透系数极显著正相关($P<0.01$),与 Li 等^[10]的研究结果一致。

表 2 土壤浸出和渗透系数的相关性分析
Table2 Correlation analysis of soil leaching and permeability coefficient

		硝态氮流出总量	渗滤液体积	土壤渗透系数 K
棕壤	Q	1	0.963**	0.962**
	V		1	1.000**
	K			1
黑土	Q	1	0.989**	0.998**
	V		1	0.987**
	K			1

注: **表示相关性达 $P<0.01$ 显著水平。

2.3 土壤中硝态氮的垂直分布

图 6 为不同玉米秸秆生物质炭添加量土壤中的硝态氮的垂直分布。棕壤中未添加生物质炭时,土壤

渗透性较强,渗滤液流出量较大(图 3A),淋洗液比较均匀地流经整个土柱,因此各层土壤对硝态氮的截留比例相似(图 6A)。当土壤中添加生物质炭时,土壤渗透性降低,淋洗液经过土柱时流速降低,流量减小(图 3A),溶液中的硝态氮主要被上层土壤截留,因此硝态氮在土壤中的垂直分布表现为上高下低的变化趋势。黑土各处理土柱中,每层土壤中硝态氮的比例差异不大,添加秸秆生物质炭后对土壤中硝态氮滞留的垂直分布没有明显影响(图 6B)。

3 结论

1) 土壤中添加生物质炭可显著降低土壤的渗透性,渗透系数和渗滤液流出量随着生物质炭添加比例的增加而降低。生物质炭添加比例相同时,棕壤的渗透系数和渗滤液流出量均大于黑土。添加少量生物质炭(1%)即可显著降低黑土的渗透性,但是生物质炭添加量达到 5% 才能显著降低棕壤的渗透性。而当生

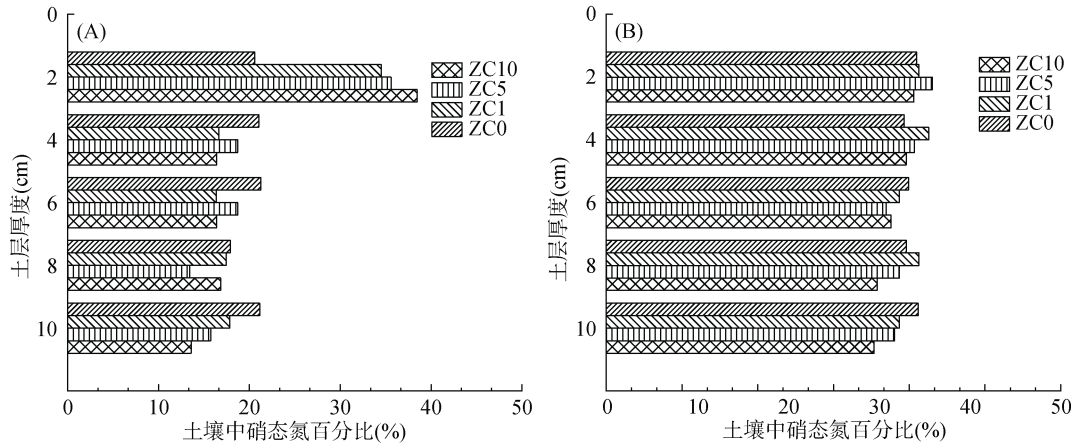


图 6 不同生物质炭添加量棕壤(A)和黑土(B)中硝态氮的垂直分布
Fig. 6 Soil nitrate nitrogen contents in different depths under different amounts of biochar added from brown soil (A) and black soil (B)

物质炭添加量继续增加到 10% 时, 则不再显著降低棕壤和黑土的渗透性。

2) 土壤中硝态氮流出量随淋洗时间的增加而增加, 然后减少并逐渐趋于稳定(除了 ZC10、HC5 和 HC10)。淋洗开始的时期随着渗滤液出流量的增加, 硝态氮的淋出量也逐渐增加。施加生物炭能够显著影响土壤中硝态氮流出总量, 土壤中硝态氮的流出总量随着生物炭的增加而降低。相同比例生物炭添加量的土壤中, 棕壤中硝态氮的流出总量远高于黑土中硝态氮的流出总量。硝态氮流出总量与渗滤液体积和土壤渗透系数极显著正相关。

3) 棕壤中添加生物炭后, 当硝态氮淋溶液流经土柱时, 大部分硝态氮被上层土壤截留, 滞留在土柱中的硝态氮比例呈现出上高下低的变化趋势。在黑土中添加秸秆生物炭后对硝态氮在各层土壤中的分布未见明显影响。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国第三产业统计年鉴-2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [2] Li B, Bi Z C, Xiong Z Q. Dynamic responses of nitrous oxide emission and nitrogen use efficiency to nitrogen and biochar amendment in an intensified vegetable field in southeastern China[J]. GCB Bioenergy, 2017, 9(2): 400–413.
- [3] 王森, 朱昌雄, 耿兵. 土壤氮磷流失途径的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(33): 22–25.
- [4] 同延安. 陕西省土壤硝酸盐累积与地下水硝酸盐污染研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [5] 雷豪杰. 水肥一体化对设施菜地氮素淋失的影响及其机制模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [6] 朱启林, 刘丽君, 张雪彬, 等. 生物炭和秸秆添加对海南热带水稻土氮素淋溶的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 193–199.
- [7] Chen X P, Duan M L, Zhou B B, et al. Effects of biochar nanoparticles as a soil amendment on the structure and hydraulic characteristics of a sandy loam soil[J]. Soil Use and Management, 2022, 38(1): 836–849.
- [8] 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.
- [9] 白一茹, 刘旭, 张钰涵, 等. 生物炭对黄绵土中 NO_3^- -N 运移过程影响及模拟[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2905–2912.
- [10] Li S L, Zhang Y W, Yan W M, et al. Effect of biochar application method on nitrogen leaching and hydraulic conductivity in a silty clay soil[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 183: 100–108.
- [11] 黄广志, 黄立华, 刘伯顺, 等. 基于 Meta 分析的苏打盐碱土改良效果评估[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 388–399.
- [12] 邹刚华, 赵凤亮, 兰雪成, 等. 不同水分条件下椰壳炭施用对稻田土壤酶活性及微生物群落的影响[J]. 土壤, 2024, 56(3): 525–532.
- [13] 王锦涛, 刘伟杰, 刘丙祥, 等. 秸秆和牛粪生物炭对矿区菜地土壤中镉的钝化效果和小白菜生长的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(11): 1524–1532.
- [14] Antor N H, Mia S, Hasan M M, et al. Chemically and biologically activated biochars slow down urea hydrolysis and improve nitrogen use efficiency[J]. Pedosphere, 2023, 33(4): 659–669.
- [15] Purakayastha T J, Bera T, Bhaduri D, et al. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security[J]. Chemosphere, 2019, 227: 345–365.
- [16] 杨慧华, 刘红叶, 张晗, 等. 果菜秸秆生物炭吸附设施土壤硝态氮性能与机制研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 386–394.
- [17] Lu L, Yu W T, Wang Y F, et al. Application of biochar-based materials in environmental remediation: From multi-level structures to specific devices[J]. Biochar, 2020, 2(1): 1–31.
- [18] 王静, 付伟章, 葛晓红, 等. 玉米生物炭和改性炭对土壤无机氮磷淋失影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2810–2820.
- [19] 刘岑薇, 叶菁, 李艳春, 等. 生物炭对茶园酸性红壤氮素养分淋溶的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(5): 181–186.
- [20] 李文娟, 颜永毫, 郑纪勇, 等. 生物炭对黄土高原不同质地土壤中 NO_3^- -N 运移特征的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 60–63, 68.
- [21] 王冰, 赵闪闪, 秦治家, 等. 生物炭对黑土硝态氮淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 73–79, 87.
- [22] Cui S, Kong F L, Li Y, et al. Effect of mineral loaded biochar on the leaching performances of nitrate and phosphate in two contrasting soils from the coastal estuary area[J]. Science of the Total Environment, 2021, 779: 146346.
- [23] 郭真真, 程红光, 王建童, 等. 生物炭添加比例及冻融对沟渠土壤氮素淋失的影响生物炭添加比例及冻融对沟渠土壤氮素淋失的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 1295–1302.
- [24] 靖彦, 陈效民, 李秋霞, 等. 施用生物炭对红壤中硝态氮垂直运移的影响及其模拟[J]. 应用生态学报, 2014, 25(11): 3161–3167.
- [25] 王燕, 庞卓, 贾月, 等. 生物炭对北京郊区砂土持水力和氮淋溶特性影响的土柱模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1820–1828.
- [26] 纪文婕. 纳米生物炭对氮素吸附——解吸效果及淋溶影响试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [27] 余辉, 方荣杰, 余佳峻, 等. 生物炭对西南喀斯特区石灰土水分入渗特征的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 225–235.

- [28] 周咏春, 郭思伯, 李丹阳, 等. 新鲜和老化生物炭对土壤氮淋失及油菜氮吸收的影响[J]. 环境科学研究, 2023, 36(3): 581–589.
- [29] 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.
- [30] 王冰, 赵闪闪, 秦治家, 等. 生物质炭对黑土吸附–解吸硝态氮性能的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 115–121.
- [31] 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.

(责任编辑: 王方方)