

李美璇, 王观竹, 郭平. 生物炭对冻融黑土中铵态氮和硝态氮淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1360–1367.

LI Mei-xuan, WANG Guan-zhu, GUO Ping. Effects of biochar on ammonium nitrogen and nitrate nitrogen leaching from black soil under freeze-thaw cycle[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1360–1367.

生物炭对冻融黑土中铵态氮和硝态氮淋失的影响

李美璇, 王观竹, 郭平*

(吉林大学环境与资源学院, 地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130012)

摘要: 为了深入研究冻融条件下生物质炭对东北黑土中铵态氮和硝态氮淋失的影响效果, 为解决冻融作用下黑土中无机氮素的淋失问题提供科学依据, 采用室内模拟土柱淋溶实验方法研究了生物质炭对经过不同冻融循环次数处理土壤中铵态氮和硝态氮淋失的影响。研究表明: 冻融会增加土壤氮素的淋失, 且淋失量与冻融次数有关, 施加生物质炭可以有效降低土壤因冻融作用引起的氮素淋失; 玉米秸秆炭对无机氮素淋失降低率在 76.15%~85.79% 之间, 树枝炭在 55.26%~68.09% 之间, 可以看出玉米秸秆炭持氮效果较树枝炭更好; 在冻融次数分别为 3 和 1 时, 玉米秸秆炭和树枝炭持氮能力最强; 两种生物质炭对铵态氮的固持能力均优于硝态氮。

关键词: 冻融; 生物质炭; 黑土; 铵态氮; 硝态氮

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)07-1360-08 doi:10.11654/jaes.2016.07.019

Effects of biochar on ammonium nitrogen and nitrate nitrogen leaching from black soil under freeze-thaw cycle

LI Mei-xuan, WANG Guan-zhu, GUO Ping*

(Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment of the Ministry of Education, College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Leaching is one of important nitrogen loss pathways. Biochar may reduce the leaching because of huge surface area. Here a laboratory column study was conducted to examine the effect of biochar applications on leaching of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in black soils from the Northeastern China under different freeze-thaw frequencies. Freezing-thawing increased nitrogen leaching, and the leaching amount was related to freeze-thaw frequency. Applying biochar effectively reduced the nitrogen leaching caused by freeze-thaw. Inorganic N leaching was reduced by 76.15%~85.79% and 55.26%~68.09%, respectively, by corn-stover and twigs biochars. Obviously, corn-stover biochar was more effective than twigs biochar did. At 3 and 1 of the freeze-thaw frequency, nitrogen fixation capacities of corn-stover and twigs were respectively the highest. In addition, biochar effect on ammonium nitrogen was greater than on nitrate nitrogen. These findings shed light on measures of reducing inorganic nitrogen leaching in black soil under freeze-thaw cycle.

Keywords: freeze and thaw; biochar; black soil; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen

氮肥是农业生产活动中普遍施用的重要肥料之一。然而, 目前氮肥利用效率比较低, 我国作物对氮肥的平均利用率约为 35%, 淋溶损失是影响氮素利用率的重要原因之一, 其造成的氮肥损失量约占总损失

量的 2%^[1]。因为淋溶作用能够导致土壤中硝态氮和铵态氮下渗到作物根系活动层之下^[2], 所以会影响植物对氮素的吸收利用。淋溶作用还会引起地下水环境的氮素污染, 危害人体健康。因此, 如何科学合理地施用氮肥, 减少氮素淋溶损失, 降低环境污染风险, 是我国农田生态系统管理和环境保护领域中亟需解决的重大问题^[3]。

生物质炭技术是一种新兴而又有效的持氮技术。生物质炭是各种有机废弃物, 如玉米秸秆、灌木树枝、

收稿日期: 2016-01-31

基金项目: 国家水污染控制与治理重大专项(2014ZX07201010)

作者简介: 李美璇(1993—), 女, 硕士研究生, 从事土壤污染与生态修复方面的研究。E-mail: 110920154@qq.com

* 通信作者: 郭平 E-mail: guoping@jlu.edu.cn

柳树叶等,在无氧或部分缺氧条件下高温热解后炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态富碳物质^[4-5]。一些学者研究了生物炭对土壤中铵态氮和硝态氮淋失的影响,结果发现施加生物炭确实能够降低土壤中铵态氮和硝态氮的淋失量,提高土壤对氮素的固持能力^[2-6],而且生物炭对土壤持氮能力的影响效果与生物炭的施加量、炭化温度以及制备材料有关。周志红等^[1]的研究结果表明生物炭施用量分别为 50、100 t·hm⁻²时,会使黑土总氮淋失量降低 29%和 74%,说明不同生物炭施用量对土壤氮素淋失的抑制效果不同。惠锦卓等^[7]也得到相似的研究结果。刘玮晶等^[5]发现不同炭化温度或原材料制备的生物炭对土壤持氮能力的影响不同,500 ℃制备的秸秆炭明显好于 300 ℃制备的秸秆炭,而且施加秸秆炭土壤的持氮能力高于施加稻壳炭的土壤。另外,生物炭对土壤持氮能力的影响还与土壤性质有关,施加等量生物炭对紫色土中氮素淋失的抑制效果好于黑土。这种差异与土壤的 pH、孔隙大小等因素有关^[1]。

我国东北黑土区是重要的粮食产区,主要分布在高纬度地区的松嫩平原东部和北部的山前台地。在长达半年的冬春季节里,土壤始终处于冻结和解冻的循环状态。冻融过程影响了土壤的理化性质^[8]和微生物的生存和繁殖,改变了土壤氮素的矿化和固定过程,进而直接或间接影响土壤的持氮能力^[9]。全球变暖可能影响土壤冻融循环格局^[10],从而改变土壤氮素淋溶特征,使东北地区黑土氮素淋失过程因冻融循环次数、冻融速率和冻融强度等因素的改变而存在很大的不确定性^[11]。已有研究表明随着冻融次数增多、冻结强度增加、持续时间延长,土壤氮素淋失加剧^[12-13]。目前,我国东北粮食产区也开始采用生物炭技术来解决土壤氮素淋失问题,并且有些学者也开始了此方面的研究。然而,到目前为止,生物炭对冻融条件下土壤持氮能力的影响效果还不清楚。

本研究选择东北黑土为对象,采用室内培养方法研究了不同冻融次数下生物炭对土柱淋出液中铵态氮和硝态氮浓度的影响随时间的变化规律,同时考查了冻融频次与施加生物炭土壤中氮素累积淋失

量和累积淋溶溶液体积之间的关系。为研究用生物炭解决中高纬度地区土壤氮素淋失问题、提高土壤氮素固持能力和氮素利用率奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤采用棋盘式法,采于吉林省长春市农业生态园(43°88'N,125°32'E)黑壤的表层土(0~20 cm)。采样区已有至少 10 年的耕作史,属温带大陆性季风气候,春夏多雨,冬季干燥寒冷。年均降雨量 400~700 mm,近年来年均气温 3.2~6.6 ℃。土壤经风干、粉碎、过 2 mm 筛后储藏备用。采用 pH 复合电极(Accumet, AccupHast, Fisher Scientific)测定土壤 pH;采用电导率仪测定电导率(EC);采用乙酸铵交换法测定阳离子交换量(CEC)^[5];采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定土壤有机碳(SOC)^[14];采用激光粒度分析仪测定土壤颗粒分布^[15];采用凯氏定氮法测定土壤中全氮的含量^[16],结果见表 1。

1.1.2 供试生物炭

供试生物炭是由玉米秸秆和五年连翘灌木树枝在 500 ℃条件下使用马弗炉(SX2-4-10,上海意丰电炉有限公司)进行热解炭化制得的玉米秸秆炭(简称秸秆炭,J)和连翘灌木树枝炭(简称树枝炭,Z)。过 60 目筛,置于干燥器中备用。

1.2 土柱设计和装填

土柱采用 PVC 材料制成,内径 6.2 cm、高 25 cm,下端用 200 目细网筛封口,同时在底部网筛上加 1 cm 厚的石英砂,再在上面铺一层尼龙布。根据土柱规格,模拟土层厚度,将处理好的土壤样品,按照粒径质量分布特征称取 780 g 土壤制备未施加生物炭的空白对照组土样(CK 处理组)。参考最佳生物炭施用量^[1,3],称取 764.4 g 土壤与 15.6 g 生物炭混合均匀后制备两种施加生物炭处理组土样(J 处理组和 Z 处理组),生物炭的添加量为 2%。采用含有氮素的蒸馏水(参考东北地区农田常用施肥量 108 kg·hm⁻²,将 0.327 g 硝酸铵溶于 237 mL 蒸馏水中)调节 CK 组、J

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Physiochemical properties of field soil

类型	pH	CEC/cmole·kg ⁻¹	SOC/g·kg ⁻¹	EC/mS·cm ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	粒径质量分布/%			
						>250 μm	50~250 μm	5~50 μm	<5 μm
黑土	6.75	37.51	18.23	1.04	1.13	16.56	60.35	19.84	3.25

处理组和 Z 处理组土壤,使其含水率为最大持水量的 90%。将土样装填入土柱中,适当按压,使其容重在 $1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右;然后在土柱上方铺一层 1 cm 厚石英砂,以免淋溶时扰动土层。为保证土柱自上而下进行冻融,将做好的土柱装入泡沫隔热板制成的外套内。

1.3 冻融处理和淋溶实验

将整个冻融实验装置(土柱和泡沫隔热板)放在冰柜中,冻融实验包括冻融组(F)和未冻融组(NF),未施加生物质炭的空白组和施加生物质炭的处理组均设置冻融组和未冻融组。冻融组放在 -25°C 冰柜冻结 2 d,然后取出放置在 5°C 冰柜融化 2 d,此过程为一个冻融循环。实验设置了具有代表性的 1、3、6 个冻融循环。未冻融组放置在 5°C 冰柜中,时间分别与 1、3、6 个冻融循环处理的时间相同。各处理重复三次。在此期间,需及时补充水分保持土壤水分含量不变。冻融处理结束后,将土柱取出放置于支架上进行淋溶实验。采用一次连续淋溶,缓慢注入总量为 300 mL 的去离子水(根据研究地冻融期平均降雨量计算获得)。整个淋溶过程需要保持水面高于土面 1 cm,从土柱底部每定量收取 15 mL 淋出液作为一个样品,同时记录每个样品达 15 mL 时的时间,分别测定每个样品中铵态氮和硝态氮浓度,并用每组取得的所有样品的累计体积与浓度计算出铵态氮和硝态氮的累计淋出量。铵态氮含量的测定采用国家标准 GB/T 7479—1987 纳氏试剂分光光度法;硝态氮含量的测定采用国家标准 GB/T 8538—1995 紫外分光光度法^[1]。

1.4 数据处理

利用 SPSS19.0 软件进行统计分析。采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 冻融频次为 1 时施加生物质炭对土柱铵态氮和硝态氮淋失的影响

由图 1 可知,在 1 个冻融循环条件下,施加秸秆炭土柱淋出液中铵态氮的最初与最终淋出浓度均较低,差值较小,铵态氮淋失浓度随时间变化曲线整体走势比较平缓;硝态氮淋溶曲线在前 40 min 呈快速下降趋势,之后变缓。在冻融和非冻融条件下,施加秸秆炭土柱淋出液中铵态氮和硝态氮最初和最终淋失浓度差分别为 $0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (冻融)和 $0.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (未冻融); $0.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (冻融)和 $0.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (未冻融)。

施加树枝炭土柱铵态氮淋失浓度随时间变化曲线出现明显高峰,高峰浓度值与淋溶末期浓度值差异较大,曲线较陡。在冻融与未冻融条件下,施加树枝炭土柱淋出液中铵态氮与硝态氮最大浓度与最终浓度的差值分别为 $1.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (冻融)、 $1.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (未冻融)以及 $0.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (冻融,未冻融)。

从图 1 可以看出,生物质炭能够增强土壤持氮能力,而且秸秆炭比树枝炭效果更好,尤其是在淋溶初期($P < 0.05$)。比较施加生物质炭对铵态氮和硝态氮的固持能力,我们发现两种生物质炭对铵态氮的固持效果都好于硝态氮。对于未施加生物质炭对照组来说,冻融土柱淋出液中的铵态氮和硝态氮淋失浓度较未冻融土柱的增大了;对于施加秸秆炭处理组来说,冻融土柱淋出液中铵态氮和硝态氮浓度明显小于未冻融土柱的($P < 0.001$),而施加树枝炭处理组浓度差不明显。这表明冻融作用会影响生物质炭对土壤氮素的固持能力,这种作用效果与生物质炭种类有关。在一

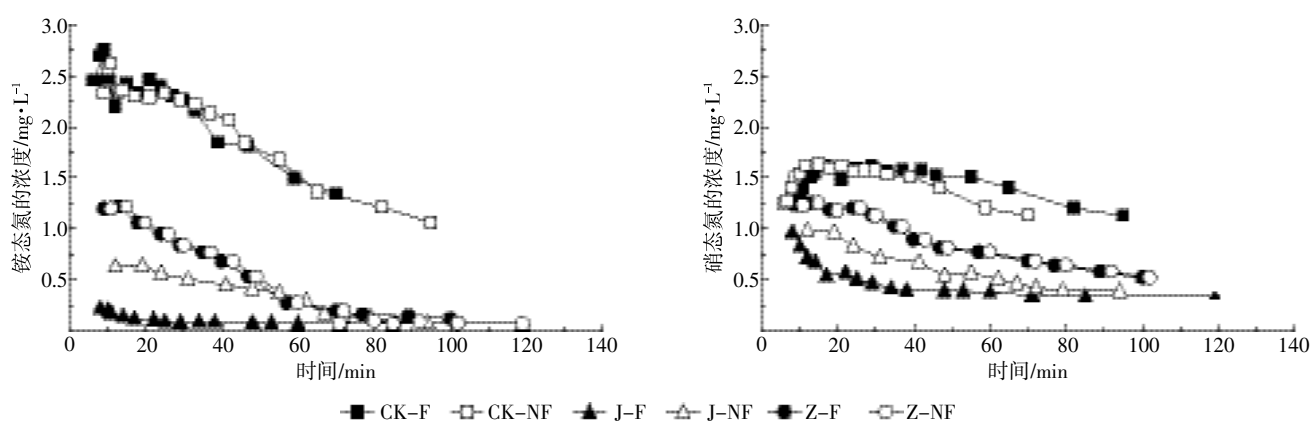


图 1 冻融频次为 1 时施加生物质炭对土柱铵态氮和硝态氮淋出浓度的影响

Figure 1 Concentrations of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in leachates after applying biochars to soil column under 1 freeze and thaw cycle

个冻融循环条件下,秸秆炭能有效减缓土壤因冻融造成的氮素淋失。

2.2 冻融频次为3时施加生物炭对铵态氮和硝态氮淋出的影响

从图2可以看出,在3个冻融循环条件下,整个淋溶过程中未施加生物炭土柱和施加生物炭土柱淋出液中铵态氮浓度随时间变化曲线均出现了明显峰值,但施加秸秆炭土柱的淋溶曲线峰值最低,仅为 $0.60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (冻融)。而未施加生物炭的土柱和施加树枝炭的土柱淋出液中铵态氮高峰浓度值与最终浓度值相差很大,差值分别是 $1.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (冻融)和 $2.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (冻融),所以整个曲线呈快速下降趋势,与1个冻融频次下的情况相同。在冻融和未冻融条件下,未施加生物炭土柱淋出液中硝态氮浓度随时间变化也出现了高峰,数值是 $0.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (冻融)。然而施加两种生物炭土柱淋出液中硝态氮浓度随时间变化的曲线均呈现平缓下降趋势。

在3个冻融频次下,对于经过冻融处理的土柱来说,未施加生物炭土柱、施加秸秆炭土柱和施加树枝炭土柱的淋溶时间分别是89、115、94 min。这表明施加生物炭延长了冻融土柱的淋溶时间,而且施加秸秆炭土柱的淋溶时间要比施加树枝炭土柱的淋溶时间长,说明在3个冻融循环条件下,施加生物炭尤其是玉米秸秆炭可以有效增加土壤的持水能力。与1个冻融频次一样,在3个冻融频次下,施加生物炭也增强了土壤持氮能力($P<0.001$),秸秆炭的持氮效果好于树枝炭,尤其是在淋溶初期($P<0.05$)。这两种生物炭对铵态氮的固持效果都好于硝态氮。

2.3 冻融频次为6时施加生物炭对铵态氮和硝态氮淋出的影响

从图3可以看出,在6个冻融循环条件下,施加秸秆炭土柱淋出液中铵态氮浓度随时间变化曲线仍然很平缓,冻融土柱淋出液的浓度峰值与最终浓度差值仅为 $0.36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而硝态氮浓度随时间变化曲线较

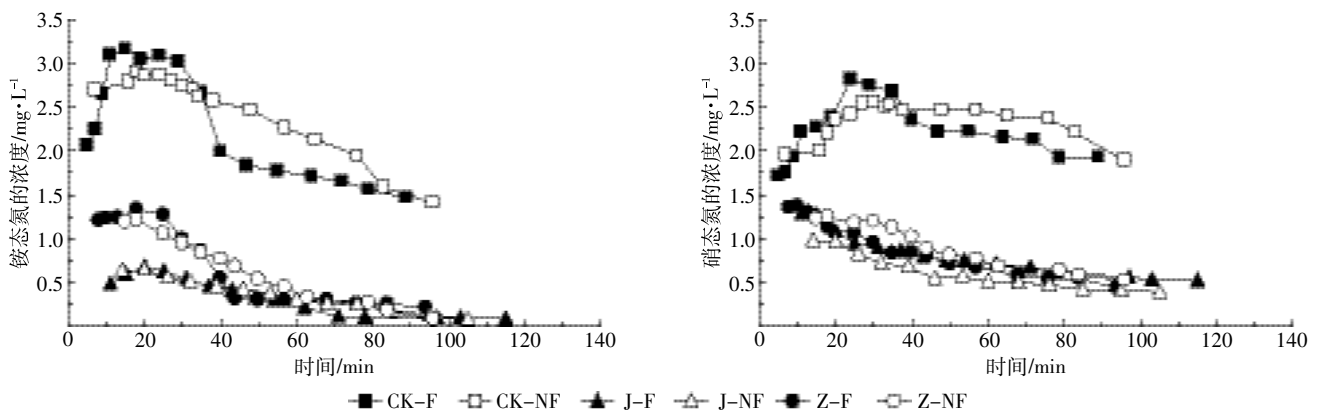


图2 三个冻融循环下施加生物炭对土柱铵态氮和硝态氮淋出浓度的影响

Figure 2 Concentrations of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in leachates after applying biochars to soil column under 3 freeze and thaw cycles

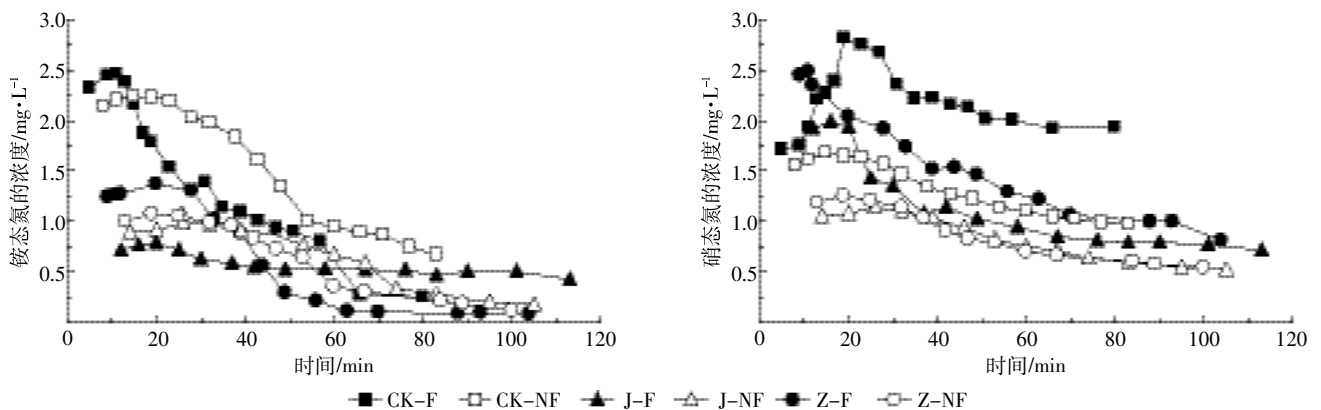


图3 六个冻融循环下施加生物炭对土柱铵态氮和硝态氮淋出浓度的影响

Figure 3 Concentration of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in leachates after applying biochars to soil column under 6 freeze and thaw cycles

1个和3个冻融循环时陡峭很多,最大浓度值及最终浓度差值可达 $1.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。施加树枝炭的土柱淋溶曲线也较1个和3个冻融循环平缓了很多。这主要是因为淋溶末期氮素淋失浓度升高了,而淋溶初期浓度没有很大变化,尤其是峰值。

与3个冻融频次相比,在6个冻融频次下,施加生物质炭也延长了土柱淋溶时间,而且施加秸秆炭的淋溶时间要比施加树枝炭的长。同样,秸秆炭对土壤的持水效果要好于树枝炭。在6个冻融频次下,对于经过冻融处理的土柱来说,未施加生物质炭土柱、施加秸秆炭土柱和施加树枝炭土柱的淋溶时间分别是80、113、104 min。这表明施加生物质炭延长了冻融土柱的淋溶时间,而且施加秸秆炭土柱的淋溶时间要比施加树枝炭土柱的淋溶时间长。

对于冻融组来说,施加生物质炭土柱淋溶初期淋出液中铵态氮和硝态氮浓度值均较未施加生物质炭土柱的低($P<0.05$),与一个冻融循环条件下的情况一致。但是在淋溶末期,施加生物质炭土柱淋出液中铵态氮和硝态氮浓度并没有像3个冻融循环下那样明显小于未施加生物质炭的对照组土柱($P>0.05$),甚至出现空白组大于处理组的情况。由此可见,虽然在6个冻融循环处理下,施加生物质炭仍然能够降低土壤氮素淋失浓度,而且秸秆炭效果仍然较树枝炭好($P<0.05$)。但是施加生物质炭和未施加生物质炭土壤的持氮能力差别减小了。这表明较高的冻融频次能够降低生物质炭对土壤氮素的固持能力。

2.4 淋出液体积与氮素累积淋失量

对不同处理土柱淋出液的体积和氮素累积淋出量进行统计计算,结果列于表2。比较各处理土柱在1、3、6个冻融循环条件下,冻融前后的水分淋失量,我们发现除了未施加生物质炭的土柱在1个冻融循环条件下冻融后淋失液体积小于未冻融的,其余的均是冻融后的淋失液体积较大,表明冻融会增加土壤水分流失。无论土柱是否经过冻融循环处理,施加生物质

炭的土柱淋出液体积均比未施加生物质炭的少,表明分别施加这两种生物质炭均可以有效地增强土壤持水能力($P<0.05$)。对于冻融处理土柱来说,在1个冻融频次下,施加秸秆炭与树枝炭土柱较未施加生物质炭土柱的淋出液体积降低率分别为8.17%、25.29%;3个冻融频次下分别为15.87%、9.52%;6个冻融频次下分别为20.80%、16.79%。可以看出,玉米秸秆炭在3个和6个冻融频次下对土壤水分的固持效果较树枝炭要好,在1个冻融频次下则与此相反。而且秸秆炭和树枝炭在冻融频次分别为6、1时固水能力最佳。

由表2可以看出,在不同冻融次数条件下,将未施加生物质炭土柱与施加两种不同生物质炭土柱相比,后者的氮素淋出量均明显小于前者($P<0.05$),而且施加秸秆炭土柱的氮素累积淋出量最小。冻融循环对土壤氮素淋失量也具有一定的影响。对于所有处理来说,基本上都是冻融频次3时氮素淋出量最大,其次是6个冻融频次。对于冻融处理的土柱来说,1个冻融频次下,施加秸秆炭与树枝炭土柱较未施加生物质炭土柱的氮素淋失量降低率分别为79.79%和68.09%;3个冻融频次下分别为85.79%和55.26%;6个冻融频次下分别为76.15%和67.89%。可以看出,玉米秸秆炭在不同冻融循环下对土壤氮素的固持效果都比树枝炭好,而且秸秆炭和树枝炭在冻融频次分别为3、1时持氮能力最佳。

3 讨论

3.1 冻融作用对土壤铵态氮和硝态氮淋失的影响

本研究结果表明,冻融会增加土壤铵态氮和硝态氮的淋失量($P<0.05$),可达4.4%~21.01%。Jackson-Blake等^[17]认为,这是因为冻融可以通过强烈的物理破坏过程改变土壤团粒结构,增大或缩小土壤团粒间的空间,必然影响氮素附着能力,所以直接降低了土壤对氮素的固持效果^[16]。此外,左海军等^[18]发现,土壤粘粒含量越高,土壤氮素发生流失的可能性就越小,而冻

表2 不同处理的土柱淋滤液体积与氮素累积淋失量

Table 2 Statistics of leachate volume and cumulated nitrogen leaching amount from soil column in different treatments

土柱处理	1个冻融频次				3个冻融频次				6个冻融频次			
	冻融		未冻融		冻融		未冻融		冻融		未冻融	
	淋滤液体积/L	氮素淋失量/mg	淋滤液体积/L	氮素淋失量/mg	淋滤液体积/L	氮素淋失量/mg	淋滤液体积/L	氮素淋失量/mg	淋滤液体积/L	氮素淋失量/mg	淋滤液体积/L	氮素淋失量/mg
CK	0.257	0.94	0.269	0.90	0.252	1.90	0.245	1.57	0.274	1.09	0.238	1.15
J	0.236	0.19	0.169	0.18	0.212	0.27	0.187	0.20	0.217	0.26	0.184	0.19
Z	0.192	0.30	0.186	0.30	0.228	0.85	0.192	0.59	0.228	0.35	0.193	0.30

融减小了土壤粘粒含量,故增加了氮素的流失。另外,多次冻融交替会使土壤发生胀缩,导致土壤颗粒重新排列,原有孔隙比发生变化,增加了土壤的渗透率,渗透率的提高会减小土壤对氮素的淋溶阻力^[10]。

此外,冻融过程会增加土壤中无机氮素的释放。这是因为冻结会引起土壤孔隙中冰晶膨胀,颗粒之间的联结被打破,导致大团聚体碎裂,变成小团聚体^[12],土壤团聚体稳定性遭到破坏,被其包裹着的小分子物质释放出来,从而增加了土壤可溶性氮素含量^[19]。范志平等^[12]证明了较低的土壤温度会直接增加土壤胶体中铵态氮的释放。另外,冻融过程会增加土壤孔隙^[19],减小土壤持水能力,导致土壤水分流失量增加^[20],土壤释放的部分可溶性无机氮素即可从土相中进入水相中,并且随着水分垂直或水平迁移,造成土壤氮素淋失量增加^[16]。

国内外一些研究表明,土壤氮素淋溶过程除了受到上述多种非生物因素外,还受到生物因素的作用。例如,有研究者^[21-22]提出冻融过程会影响土壤微生物的生长和繁殖,改变微生物的活性,进而作用于土壤氮素的矿化和固定过程^[9]。低温甚至造成部分微生物死亡并引发氮素释放,也是土壤无机氮素淋失量增加的重要因素^[20]。

本研究发现冻融频次也会影响土壤氮素淋失量。随着冻融次数的增加,因冻融造成的土壤氮素淋失增加量呈先增加后降低趋势。这可能由于影响氮素淋失的上述过程与冻融循环次数有关

3.2 冻融条件下施加生物炭对土壤中铵态氮和硝态氮淋失量的影响

实验结果表明,在冻融条件下,施加这两种生物炭能够有效抑制黑土中铵态氮和硝态氮的淋失,抑制效果可达55.26%~85.79%。这是因为生物炭具有很多有利于持氮的物理性质,如孔隙发达、比表面积大等^[23],可以为氮素提供大量的吸附位点。而且生物炭施入土壤后较易形成大团聚体,可以修复因冻融造成的团聚体的破碎^[24],增加土壤吸附氮素的能力。另外,生物炭表面电荷多、电荷密度高,能够吸附土壤中水相和土相中如 NH_4^+ 、 NO_3^- 等的无机离子^[4]。实验结果显示,施加生物炭对土柱中铵态氮淋失的抑制效果高于硝态氮。之前 Kettunen 等研究表明,这是因为生物炭表面富含更多负电荷,对阳离子有更好的吸附作用^[25]。此外,生物炭呈弱碱性,能够提高土壤pH^[26]、并增加含氧官能团数量,从而提高土壤阳离子交换量,增加土壤吸附 NH_4^+ 的能力^[4]。这也是生物炭

对土壤中铵态氮固持效果好于硝态氮的原因。

本实验结果表明施加生物炭还可以增强冻融后土壤的持水能力,持水效果可达8.17%~25.29%,这主要是因为生物炭拥有大量微孔,且密度一般在 $0.1\sim 0.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,远小于土壤密度,故施加生物炭可以降低土壤密度^[27],增加土壤孔隙度,进而增加了它的持水性^[18]。此外生物炭有丰富的表面官能团^[28],可以吸附土壤中的水分,减少土壤冻融后导致的水分的渗漏流失。由于氮素淋溶主要发生在溶液中,生物炭可以通过减少水分流失来抑制氮素的淋失^[29]。

从本实验结果可以看出,玉米秸秆炭在冻融条件下的持氮效果好于树枝炭,3个冻融循环下的效果差异最显著,可达30.53%,而且在淋溶初期就能有效降低氮素淋失量。陈心想等^[23]研究证明,制备生物炭原料不同,对氮素流失的抑制程度有明显差异。这主要是因为生物炭对土壤持水量、持氮量的影响取决于生物炭的颗粒度、比表面积、密度、孔隙结构及表面官能团组成等因素^[10,23]。与树枝炭比较,玉米秸秆炭的优势在于其炭质密度较低,本实验在装填土柱时发现,施加相同质量生物炭时,施入土壤中树枝炭的体积要小于玉米秸秆炭的体积。此外,玉米秸秆炭孔隙结构比树枝炭更发达^[24]。这是因为玉米秸秆热稳定性比树枝的低,在相同热解温度炭化后玉米秸秆的累积质量损失较树枝炭多,即灰分含量较低,有更多可燃性气体挥发,从而使秸秆炭形成更多的孔隙结构和较大的比表面积,较大的施加体积以及较发达的孔隙结构,也使玉米秸秆炭在持水持氮方面效果更加突出^[30]。

此外,我们发现,冻融频次不同会造成生物炭持氮效果不同。冻融频次越多,生物炭对土壤持氮能力的改善作用越差。这可能是因为随着冻融频次的增加,生物炭的比表面积大小和发达的孔隙结构也随之改变,减弱了生物炭对土壤氮素的固持效果。

4 结论

(1)冻融过程会增加土壤中铵态氮和硝态氮以及水分的淋失量,而且这种作用和冻融频次有关,未施加生物炭土柱的铵态氮和硝态氮淋失总量和淋溶体积分别在3个和6个冻融频次下达到最大。

(2)在1、3、6个冻融频次下,施加玉米秸秆炭和树枝炭都可以有效降低土壤氮素和水分的淋出量,且降低效果与冻融频次有关。施加秸秆炭和树枝炭土柱分别在3个和1个冻融频次下持氮能力最强;分别在6、1个冻融频次下固水能力最强。在1、3、6冻融频次

下,两种生物质炭对铵态氮的淋失浓度降低效果均好于硝态氮。

(3)在冻融条件下,不同原材料制备的生物质炭对土壤持氮和固水能力的改善效果不同。施加玉米秸秆炭的土壤在1、3、6个冻融频次下持氮和持水效果都优于施加树枝炭的,尤其是在淋溶初期。施加玉米秸秆炭的土壤在3个冻融频次下氮素淋出量最少。

参考文献:

- [1] 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.
ZHOU Zhi-hong, LI Xin-qing, XING Ying, et al. Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soil[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(2): 278-284.
- [2] 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.
- [3] 刘玉学, 吕豪豪, 石岩, 等. 生物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 Yu-xue, LÜ Hao-hao, 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.
- [4] 刘玮晶. 生物质炭对土壤中氮素养分滞留效应的影响[D]. 南京农业大学, 2012.
LIU Wei-jing. Effects of biomass charcoals on retention of nitrogen in soils[D]. Nanjing Agricultural University, 2012.
- [5] 刘玮晶, 刘焱, 高晓荔, 等. 外源生物质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.
LIU Wei-jing, LIU Ye, GAO Xiao-li, et al. Effects of biomass charcoals on retention of ammonium nitrogen in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 962-968.
- [6] 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 Environmental Quality*, 2012, 41(4): 1131-1137.
- [7] 惠锦卓, 张爱平, 刘汝亮, 等. 添加生物炭对灌淤土壤养分含量和氮素淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 156-161.
HUI Jin-zhuo, ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, et al. Effects of biochar on soil nutrients and nitrogen leaching in anthropogenic-alluvial soil[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(2): 156-161.
- [8] 贾国晶, 周永斌, 代力民, 等. 冻融对长白山森林土壤碳氮矿化的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 624-628.
JIA Guo-jing, ZHOU Yong-bin, DAI Li-min, et al. Effect of freezing-thawing on the carbon and nitrogen mineralization in Changbai Mountain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(4): 624-628.
- [9] Henry H A L. Soil freeze thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(5): 977-986.
- [10] 陈哲, 杨世琦, 张晴雯, 等. 冻融对土壤氮素损失及有效性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(4): 1083-1094.
CHEN Zhe, YANG Shi-qi, ZHANG Qing-wen, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil nitrogen loss and availability[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 1083-1094.
- [11] Gärdenäs A I, Ågren G I, Bird J A, et al. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions—from molecular to global scale[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4): 702-717.
- [12] 范志平, 李胜男, 李法云, 等. 冻融交替对河岸缓冲带土壤无机氮和土壤微生物量氮的影响[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(4): 106-111.
FAN Zhi-ping, LI Sheng-nan, LI Fa-yun, et al. Effect of freezing-thawing on soil dissolved inorganic nitrogen and soil microbial biomass nitrogen in riparian zone[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, 29(4): 106-111.
- [13] Campbell J L, Reinmann A B, Templer P H. Soil freezing effects on sources of nitrogen and carbon leached during snowmelt[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(1): 297-308.
- [14] 王英惠, 杨旻, 胡林潮, 等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳矿化及腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1585-1591.
WANG Ying-hui, YANG Min, HU Lin-chao, et al. Effects of biochar amendments synthesized at varying temperatures on soil organic carbon mineralization and humus composition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1585-1591.
- [15] Kværnø S H, Øygarden L. The influence of freeze thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway[J]. *Catena*, 2006, 67(3): 175-182.
- [16] 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 等. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤氮素淋溶损失的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 439-448.
GOU Xiao-lin, WU Fu-zhong, YANG Wan-qin, et al. Effect of changes in seasonal freeze-thaw pattern on nitrogen loss from leaching in the alpine forest soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 439-448.
- [17] Jackson-Blake L, Helliwell R C, Britton A J, et al. Controls on soil solution nitrogen along an altitudinal gradient in the Scottish uplands[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 431: 100-108.
- [18] 左海军, 张奇, 徐力刚, 等. 农田土壤氮素径流损失的影响因素及其防治措施研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 64-67.
ZUO Hai-jun, ZHANG Qi, XU Li-gang, et al. Influencing factors of nitrogen runoff loss from farmland soil and its prevention measures[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(6): 64-67.
- [19] 刘绪军, 景国臣, 杨亚娟, 等. 冻融交替作用对表层黑土结构的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 42-46.
LIU Xu-jun, JING Guo-chen, YANG Ya-juan, et al. Effects of alternate freezing and thawing on the structure of black topsoil[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(1): 42-46.
- [20] Wu F, Yang W, Zhang J, et al. Fine root decomposition in two sub-alpine forests during the freeze-thaw season[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, 40(2): 298-307.
- [21] 谭波, 吴福忠, 杨万勤, 等. 雪被去除对川西高山森林冬季土壤温度及碳、氮、磷动态的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2553-2559.
TAN Bo, WU Fu-zhong, YANG Wan-qin, et al. Effects of snow pack removal on the dynamics of winter-time soil temperature, carbon, ni-

- trogen, and phosphorus in alpine forests of west Sichuan[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2553-2559.
- [22] 隗英华, 刘 艳, 田路路, 等. 冻融交替对农田棕壤氮素转化过程的调控效应[J]. 土壤, 2015, 47(4):647-652.
- JUAN Ying-hua, LIU Yan, TIAN Lu-lu, et al. Regulation effects of freezing-thawing cycle on farmland brown soil nitrogen transformation process[J]. *Soils*, 2015, 47(4):647-652.
- [23] 陈心想, 耿增超. 生物质炭在农业上的应用[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(2):167-174.
- CHEN Xin-xiang, GENG Zeng-chao. Application of biochar in agriculture[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat Sci Ed)*, 2013, 41(2):167-174.
- [24] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2459-2463.
- ZHANG A-feng, PAN Gen-xing, LI Lian-qing. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2459-2463.
- [25] Kettunen R, Saarnio S. Biochar can restrict N₂O emissions and the risk of nitrogen leaching from an agricultural soil during the freeze-thaw period[J]. *Agricultural and Food Science*, 2013, 22(4):373-379.
- [26] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10):1948-1955.
- GAO Hai-ying, HE Xu-sheng, CHEN Xin-xiang, et al. Effect of biochar and biochar-based ammonium nitrate fertilizers on soil chemical properties and crop yield[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(10):1948-1955.
- [27] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2):117-128.
- [28] 孔丝纺, 姚兴成, 张江勇, 等. 生物质炭的特性及其应用的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4):716-723.
- KONG Si-fang, YAO Xing-cheng, ZHANG Jiang-yong, et al. Review of characteristics of biochar and research progress of its applications[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(4):716-723.
- [29] 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.
- GAI Xia-pu, LIU Hong-bin, ZHAI Li-mei, et al. Effects of corn-stalk biochar on inorganic nitrogen leaching from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2):310-318.
- [30] 陈 琳, 乔志刚, 李恋卿, 等. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(5):671-675.
- CHEN Lin, QIAO Zhi-gang, LI Lian-qing, et al. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5):671-675.