

秸秆生物炭输入对冻融期黑土表层无机氮磷垂直迁移的影响

师澜峰, 米彩虹, 郭成久, 王瑄, 周丽丽, 许秀泉, 刘菁华

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866)

摘要: 为研究秸秆生物炭输入对冻融期黑土表层无机氮磷垂直迁移的影响, 采用室内模拟冻融循环试验, 设置冻融与不冻融、冻融循环次数和生物炭施加量 3 个影响因素, 分析冻融作用下不同秸秆生物炭输入量土壤表层无机氮磷垂直迁移特征。结果表明: (1) 冻融与不冻融、冻融循环次数及生物炭施加量对黑土表层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 垂直迁移液总体积、迁移液总浓度及迁移总量均有极显著影响。(2) 淋溶时间随冻融作用增强而缩短, 随生物炭施加量增加而延长。所有处理迁移液总体积均随生物炭输入量的增加呈降低趋势。未冻融组迁移液总体积随培养期增加呈现缓慢下降趋势, 冻融组处理迁移液总体积在第 5 次冻融循环试验出现急剧增加, 而后趋于平稳。(3) 分析冻融作用下秸秆生物炭输入对无机氮磷垂直迁移累积影响, 同一控制时间内生物炭对冻融组无机氮磷垂直迁移量的抑制作用大于不冻融组, 且随生物炭施入量增加对无机氮磷垂直迁移的抑制作用增强。由于土壤物理性质的改变, 冻融组 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 累积迁移量均在第 5 次冻融循环左右发生急剧变化。综上可知, 生物炭在冻融期可以有效的固持养分, 研究结果可为寒冷地区解冻期面源污染防治提供一定的理论支持。

关键词: 秸秆生物炭; 冻融期; 无机养分; 垂直迁移

中图分类号: S158; S155.2⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)06-0278-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.06.040

Effect of Straw Biochar on Vertical Migration of Inorganic Nitrogen and Phosphate in Surface Layer of Black Soil During Freezing and Thawing Period

SHI Lanfeng, MI Caihong, GUO Chengjiu, WANG Xuan, ZHOU Lili, XU Xiuquan, LIU Jinghua

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: In order to explore the effect of straw biochar on vertical migration of inorganic nitrogen and phosphorus in surface layer of black soil during freezing-thawing period. This research adopts the indoor simulation of freezing-thawing cycle experiment, set the freezing-thawing and not-freezing-thawing, freezing-thawing cycles, biochar apply three influence factors, to analyze the vertical migration characteristics of soil surface inorganic nitrogen and phosphorus under freezing-thawing with different straw biochar apply. (1) Results show black soil surface freezing-thawing and not-freezing-thawing, freezing-thawing cycles and biochar apply have significant effect on $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ inorganic nitrogen and phosphorus migration liquid total volume, total concentration and total amount of migration through freezing-thawing and not-freezing-thawing, freezing-thawing cycles and biochar apply. (2) The leaching time was shortened with the increase of freeze-thaw action and prolonged with the increase of biochar application. All treatments of inorganic nitrogen and phosphorus migration liquid volume show a decrease trend with the increase of biochar input. The total volume of migration liquid in not-freezing-thawing group show a slowly decrease trend as the incubation period increase. The total volume of the migration liquid volume in the freezing-thawing group increases sharply in the 5th freezing-thawing cycle test, and then became stable. (3) The effect of biochar on the vertical migration and accumulation of inorganic nitrogen and phosphorus under freeze-thaw action was analyzed. During the same control period, the inhibition of biochar on the vertical migration of inorganic nitrogen and phosphorus in the freeze-thaw group was greater than that in the non-freeze-thaw group. Because of changes in the physical properties of the soil, the accumulated migration of the freezing-thawing group $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ changed dramatically around the fifth freezing-thawing cycle. To sum up, biochar can effectively retain nutrients during freezing-thawing period, and the research

收稿日期: 2018-06-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471225); 辽宁省博士科研启动基金项目(201601105)

第一作者: 师澜峰(1993—)男, 硕士研究生, 主要从事水土流失与农业面源污染防治研究。E-mail: 1051493339@qq.com

通信作者: 米彩虹(1983—)女, 讲师, 博士, 主要从事水土流失与农业面源污染防治研究。E-mail: micaihong@126.com

results can provide some theoretical support for the prevention and control of rural surface pollution during thawing period in cold regions.

Keywords: straw biochar; freeze-thaw period; inorganic nutrients; vertical migration

土壤中无机氮磷可直接被植物根系吸收利用,是土壤肥力中最活跃的因素,也是影响农作物产量的主要限制性因子之一^[1]。农田中无机氮磷的大量流失可导致土壤质量退化及水体富营养化,直接危害土壤持续利用和生态环境健康发展^[2]。在我国东北黑土区春季冻融期,由于气温不稳定回升,导致地表积雪间断性融化。同时表层土壤经过反复冻融作用,使得土壤无机氮磷的垂直迁移对整个农田养分流失有非常重要的影响^[3]。随着气温升高,表层冻土融化,土壤无机氮磷充分溶解在土壤溶液中^[4]。在土壤未完全解冻前,表层土壤氮磷随水分向下迁移到渗透性极弱的冻土层以上。一部分无机养分在冻土彻底融化前,随融水壤中流失^[5];一部分在冻土融化后,在融雪水或冻融期雨水作用下,以淋溶形式流失^[6]。由此可见,冻融期黑土表层土壤无机氮磷在冻土层以上的垂直迁移与累积特征直接关系到整个冻融期农田养分流失和水环境污染等生产与生态问题。

近年来,针对黑土区养分流失防治措施研究较多,其中包括秸秆覆盖、增施有机肥等^[7]。但是关于冻融期养分流失的重要部分,土壤表层无机氮磷垂直迁移的防治途径,尚缺少针对性研究。秸秆生物炭是指秸秆在完全或者部分缺氧和相对低温($<700\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下炭化产生的一类高度芳香化难熔性固态物质。生物炭具有结构多孔性和比表面积大的特性,可改善土壤容重和孔隙结构,进而影响土壤的通透性和养分溶液渗透以及停留时间,从而对土壤养分垂直迁移起到抑制作用^[8]。生物炭还可以使土壤对无机氮磷的吸附能力增强,对表层土壤无机氮磷的淋失起到减少效果,从而对土壤中的作物生长所需的养分起到很好的固持效果^[9]。可见,生物炭可以通过改变土壤理化性质直接或间接对土壤无机氮磷淋失产生影响。但是,在东北黑土区春季反复冻融作用下,生物炭输入后对表层土壤无机氮磷垂直迁移有何影响?冻融作用下生物炭是否能很好地起到固持土壤养分作用?目前尚缺少相关研究。

本文为研究秸秆生物炭输入对寒冷地区冻融期土壤无机氮磷垂直迁移影响,选取典型土壤—黑土为研究对象,通过室内模拟冻融循环试验研究秸秆生物炭输入后,表层黑土无机氮磷垂直迁移过程。旨在探明东北黑土区冻融期特殊气候及水分条件下,秸秆生物炭对土壤无机氮磷垂直迁移影响机理,研究结果可为黑土区冻融期土壤养分流失及面源污染防治提供

一定的理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料采集与制备

试验所用土壤于2017年4月采集自黑龙江省齐齐哈尔市拜泉县($126^{\circ}14'47.7''\text{ E}$, $47^{\circ}26'39.6''\text{ N}$)玉米大田表层(0—20 cm)土壤。该地区为我国东北典型黑土区,土壤质地为壤质黏土,全年降水量500~600 mm,年平均气温为 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季土壤冻结深度一般为2.2 m,春季季节性冻融作用明显。本试验在田间均匀设置多个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的样方取土,清理表层作物残茬后收集每个样方内表层土壤,然后将土壤充分混合后取部分装袋带回室内,除去作物叶子、根系和石块等杂物后备培养试验用。经测定^[10-11],供试土壤的容重为 1.07 g/cm^3 ,饱和含水率为54%,pH(水浸提法)为6.8,有机质含量 45.8 g/kg ,全氮含量 2.5 g/kg ,全磷含量 0.7 g/kg ,全钾含量 24.9 g/kg ,速效磷含量 17.8 mg/kg ,速效钾含量 170 mg/kg ,各级颗粒所占比例为(国际制): $2\sim 0.02\text{ mm}$ 砂粒占41.35%, $0.02\sim 0.002\text{ mm}$ 粉粒占32.37%, $<0.002\text{ mm}$ 黏粒占26.27%。本试验所用生物炭以东北地区主要农作物废弃物玉米秸秆为原材料,委托辽宁省生物炭技术研究中心制备。采用适用地域广、操作简便的专利炭化炉以亚高温缺氧干馏为原理,于裂解温度为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 生产制备。因本试验为机理性试验,为使秸秆生物炭更加均匀地与土壤混合,充分发挥生物炭作用,选取过 2 mm 筛后的较细颗粒生物炭作为试验材料。经测定,生物炭比表面积为 $0.85\text{ m}^2/\text{g}$,pH 7.74,电导率 179.6 S/m ,有机质39.6%,全氮1.09%,全磷 0.37 g/kg ,有效磷 19.3 mg/kg 。

1.2 试验方法

1.2.1 培养试验 根据秸秆年产量,查阅国内外关于生物炭改良土壤相关文献,同时参考生物炭在黑土区农田施用的推广经验^[12-13],试验设置对照处理,炭土比为0(CK),施炭处理设置炭土比为2%(B2)和4%(B4),在此比例下,生物炭能够很好的发挥其改良土壤的作用,又不会对生态环境引起明显的负面影响^[14]。将混合后的土壤于2017年5月移至沈阳农业大学水利学院综合试验基地野外培养小区中,小区规格为 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$,每个处理设置6个重复小区,填土厚度约25 cm,所有小区采用随机区组排列。培养天数设置为90天。培养期结束后,测定经自然压实后的土层厚度约为20 cm。

1.2.2 冻融试验 在2017年8月培养期结束后,在

每个小区内分层(0—5, 5—10, 10—15 cm)取土, 去除植物残留物、石块等杂物后风干, 过孔径为 2 mm 的土壤筛以备填装冻融土柱。为避免冻融过程中装置胀缩破裂, 土柱装置采用硬质透明有机玻璃管制成。有机玻璃管规格: 内径 8 cm, 高 20 cm, 壁厚 0.5 cm, 下端均匀打孔(孔直径 0.5 cm, 孔边距 0.5 cm)。具体冻融装置示意图见图 1。

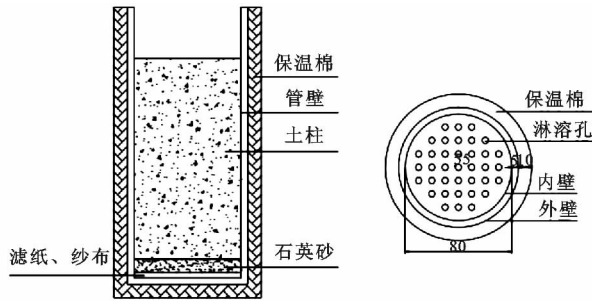


图 1 冻融装置示意

在冻融期, 由于部分积雪融化及土体解冻, 表层土壤含水率普遍较高, 野外实测土壤含水率约为田间饱和含水率的 90%^[15]。在 2017 年 8 月填装土柱之前, 测定各培养小区土壤容重以及饱和含水率(表 1), 确定土柱填土量及土壤含水率。用去离子水调节各处理土壤含水率至田间饱和含水率的 90%, 常温下闷土 24 h。在土柱内壁均匀涂抹凡士林(防止形成优先流), 并在管内下部自下而上分别铺设一层定量滤纸、纱布、1 cm 厚石英砂(去离子水洗净, 起过滤水样的作用)。按照实测容重将各处理土样分层(0—5, 5—10, 10—15 cm), 填装土柱, 形成 15 cm 高土柱(在野外观测试验中发现, 壤中流流量较大的土壤厚度约为 10~15 cm 处, 所以土柱设定为 15 cm)^[16]。装填土柱时, 特别注意将圆柱管边缘的土样压实, 以确保无贴壁水流入渗, 尽量减少边缘效应的产生; 各层之间作打毛处理, 为保证土柱可以模拟自然土体自上而下冻融规律, 在土柱外侧包裹一层厚度为 1 cm 的保温棉。每个处理 3 次重复。

表 1 不同培养小区土壤容重以及饱和含水率

炭土比 处理	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和 含水率/%
CK	1.079	71.9
B2	1.005	76.3
B4	0.946	79.4

土柱装填结束后, 于 2017 年 8—9 月进行冻融试验。所有处理设置冻融组(F)和未冻融组(NF)。冻融组土柱: 将冻融组土柱置于自制冻融循环仪(精度 ± 0.3 °C)中进行冻融试验; 通过查阅研究地冻融期气温日变化, 设定 -10 °C 下冻结 14 h, 8 °C 下融化 10 h 为 1 个冻融循环; 分别在 0, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20 次冻融循环后, 取出土柱进行淋溶试验。未冻融土柱: 将

未冻融土柱同样置于自制冻融循环仪中, 温度设置为 8 °C, 与冻融组土柱处理时间相同, 在对应冻融循环后也取出土柱进行淋溶试验。

1.2.3 淋溶试验 在 2017 年 8—9 月冻融循环试验结束后, 将冻融组 and 对应未冻融组土柱取出, 放置在支架上进行淋溶试验。采用一次连续淋溶, 缓慢注入总量为 500 mL 去离子水, 整个淋失过程中始终使土柱内水面高于土面 1 cm, 每淋出 25 mL 为 1 个样品, 同时记录淋出时间。

1.2.4 指标测定方法 在 2017 年 8—10 月期间将淋溶试验所获样品使用低速恒温离心机进行离心, 设定离心机转速为 5 000 r/min, 时间为 5 min。并将离心液进行过滤待测。指标测定方法为: 水溶性磷采用钼蓝比色法测定; 硝态氮、铵态氮采用连续流动分析仪测定; pH 采用台式 pH 计进行测定; 电导率采用电导率仪进行测定。生物炭比表面积采用气体吸附 BET(Brunauer-Emmett-Teller)比表面积检测法^[17]。

1.3 数据分析

应用方差分析, 分析冻融及不冻融、冻融次数、生物炭施加量及因素间相互作用对无机养分垂直迁移指标是否有显著性影响。应用 Excel 2007 和 DPS 7.05 软件进行无机氮磷垂直迁移特征数据处理及作图分析。

2 结果与分析

2.1 冻融作用下生物炭输入对黑土表层无机氮磷垂直迁移总体分析

通过土柱模拟试验得出各处理淋滤液无机氮磷总浓度、淋滤液总体积及垂直迁移总量等指标。利用三因素方差分析方法, 分析生物炭施加量、冻融与不冻融、冻融循环次数对以上 3 个重要指标的显著性影响, 结果见表 2。从表 2 可以看出, 除冻融与不冻融对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总浓度无显著性影响外, 冻融与不冻融、冻融循环次数及生物炭施加量对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 等 3 种无机氮磷迁移液总体积和迁移总量都有极显著影响($p < 0.01$)。分析试验三因素之间交互作用对无机养分垂直迁移影响, 得出冻融与不冻融和冻融次数交互作用对无机养分总体积和总迁移量均有显著性影响; 而冻融与不冻融和生物炭施加量, 冻融次数与生物炭施加量之间交互作用对无机氮磷垂直迁移影响规律并不明显。分析试验小区基础数据(表 1), 可以看出由于生物炭施加量的增加, 土壤容重减小, 饱和含水率增加。由此可见, 生物炭输入可改善土壤持水性能, 从而对无机养分迁移液总体积有显著性影响。经冻融作用后, 土壤性质及养分浓度发生一定变化, 所以冻融循环对无机养分垂直迁移指标有显著性影响^[18]。

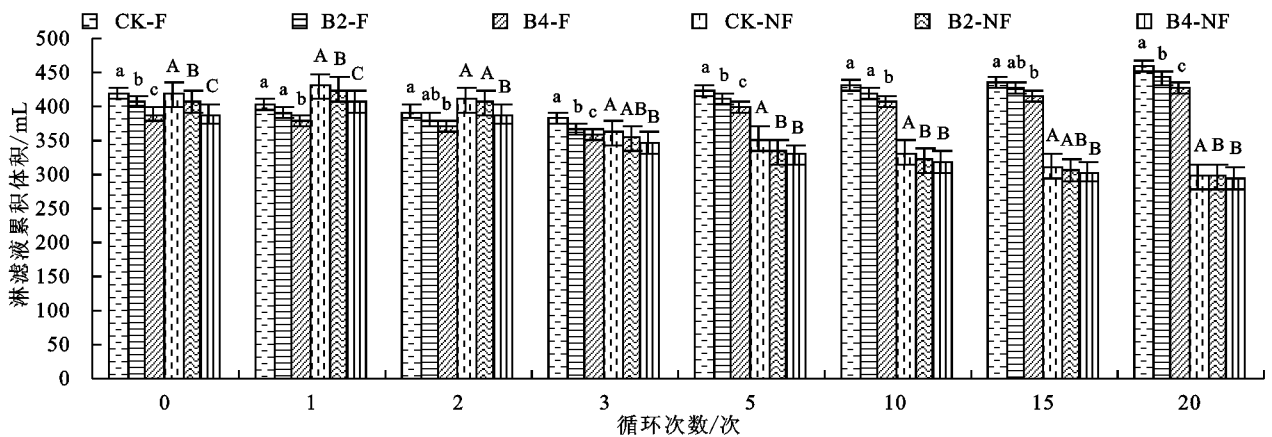
表 2 冻融与不冻融、冻融次数、生物炭含量对无机氮磷垂直迁移指标的方差分析 p 值

无机氮磷垂直迁移指标	冻融与不冻融	冻融次数	生物炭含量	冻融与不冻融 × 冻融次数	冻融与不冻融 × 生物炭含量	冻融次数 × 生物炭含量
NO_3^- -N 总浓度	0.099	0.001	0.001	0.055	0.094	0.090
NH_4^+ -N 总浓度	0.611	0.001	0.001	0.578	0.051	0.059
PO_4^{3-} -P 总浓度	0.001	0.001	0.001	0.001	0.319	0.002
淋滤液总体积	0.001	0.001	0.001	0.001	0.038	0.436
NO_3^- -N 总迁移量	0.001	0.001	0.001	0.001	0.041	0.467
NH_4^+ -N 总迁移量	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004	0.584
PO_4^{3-} -P 总迁移量	0.001	0.001	0.001	0.001	0.017	0.060

注: p 代表统计的显著性, $p < 0.05$ 表示存在显著性差异, $p < 0.01$ 表示存在极显著性差异。

从图 2 可以看出, 在冻融过程中, 所有处理无机氮磷迁移液总体积都随生物炭输入量的增加而呈降低趋势。未冻融组处理迁移液总体积随培养期增加基本呈现下降趋势, 且变化较为平缓; 冻融组处理迁

移液总体积在第 5 次冻融循环试验呈现骤增趋势, 以后趋于平稳。分析其原因, 第 5 次冻融循环时, 土壤孔隙度、团聚体等物理性质发生剧变, 导致土壤持水性发生改变, 从而引起淋滤液体积骤增^[19-20]。



注: 图中不同大小写字母分别表示各循环次数下冻融或不冻融组处理内显著性差异。

图 2 冻融作用下施加生物炭对淋滤液总体积的影响

2.2 冻融作用下生物炭输入对表层土壤无机氮素垂直迁移的影响

从图 3 可知, 随着冻融循环次数的增加, 养分垂直迁移时间也随之增长, 同时冻融组淋失所用时间小于不冻融组所用时间。同一冻融频次下, 随生物炭施加量递增, 淋失所用时间增加。因此冻融组与不冻融组组处理在经过 20 次冻融循环或培养 20 天后, 淋失所耗时间最长, 分别是 140 min (B4-F 组) 和 163 min (B4-NF 组)。

所有处理中 NO_3^- -N 最终累积淋失量均随着冻融循环次数的增多而递增, 同时随着生物炭施加量的增加而递减。累积淋失量最大值分别出现在 20 次冻融循环条件下, 为 46.81 mg (B4-F 组), 23.88 mg (B4-NF 组)。B2、B4 处理 NO_3^- -N 最终累积淋失量在第 5 次冻融循环之前表现为不冻融组大于冻融组, 在第 5 次冻融循环之后冻融组大于不冻融组。CK 处理 NO_3^- -N 最终累积淋失量在第 3 次冻融之后发生改变。各冻融组和不冻融组间施炭处理, NO_3^- -N 最终累积淋失量差值极大值同样出现在第 20 次冻融循环, 分别为 22.93 mg (CK), 17.4 mg (B2), 7.5 mg (B4)。冻融组生物炭对 NO_3^- -N 淋失量的抑制作用随着冻融循环次数增加而减小, 处理

间差值由最初 7.15 mg 增至 20.36 mg, 而不冻融相差幅度变化较小。由以上可知, 冻融期生物炭对 NO_3^- -N 垂直迁移量的抑制作用要大于常温培养期。 NO_3^- -N 最终累积淋失量随时间变化曲线整体走势为先逐渐增大后趋于平缓。

由图 4 可知, 大部分处理 NH_4^+ -N 累积淋失量曲线走势逐渐变缓。随冻融循环次数的增多, NH_4^+ -N 最终累积淋失量呈现先减少后增大的变化趋势。同样拐点位于第 5 次冻融循环之后, 累积淋失量分别为 0.81 mg (CK-F), 0.72 mg (CK-NF), 0.64 mg (B2-F), 0.54 mg (B2-NF), 0.46 mg (B4-F), 0.41 mg (B4-NF)。同时, 冻融作用使土壤 NH_4^+ -N 最终累积淋失量增加, 并且随着冻融次数的增加 F 组和 NF 组差值越大, 最大差值出现在 20 次冻融循环之后, 分别为 0.49 mg (CK), 0.33 mg (B2), 0.21 mg (B4)。生物炭施加量对 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 最终累积淋失量的影响规律相同。其中两者最大累积淋失量均出现在在进行 20 次冻融循环作用的对照组中, 分别是 1.30 mg (NH_4^+ -N) 和 46.81 mg (NO_3^- -N)。同时, NH_4^+ -N 最终累积淋失量较 NO_3^- -N 最终累积淋失量减小较多。

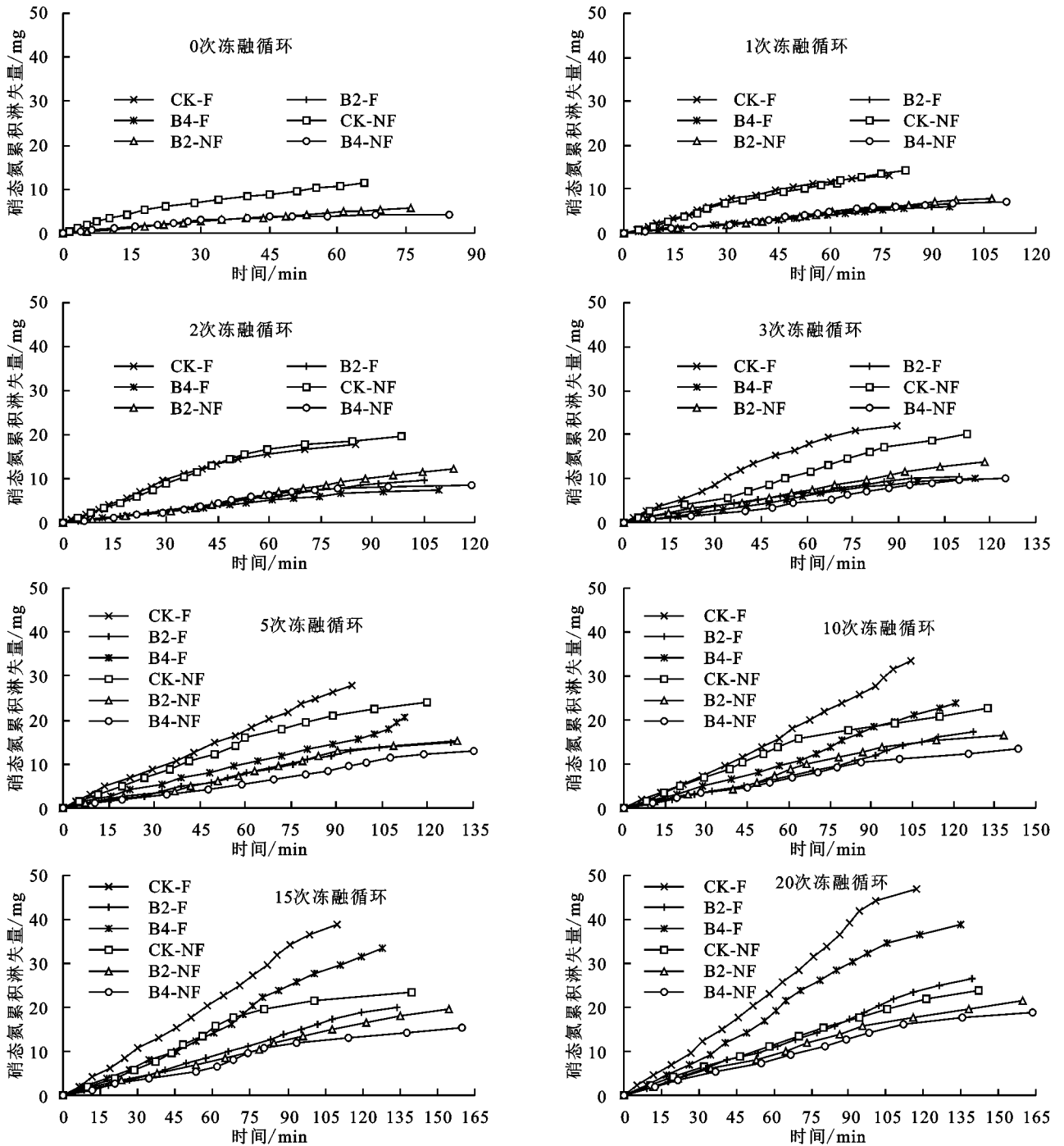


图 3 冻融作用下施加生物炭对黑土硝态氮累积垂直迁移量影响

从图 3、图 4 可以看出,无论冻融与不冻融,生物炭均能有效抑制土壤矿质氮素的垂直迁移,而且随着施加量的增加矿质氮素淋失量越少。其原因可能是生物炭具有体积小,比表面积大,拥有较发达的孔隙结构和表面能的特点,因此能在淋失过程中引起土壤孔隙度改变从而较大的吸持水分,阻止水分的垂直迁移,进而降低随水分而流失的矿质氮素^[21];另一方面,生物炭表面具有大量的正负电荷,能够更多吸附、固定土壤中的 NO_3^- 、 NH_4^+ ^[22]。生物炭施加量的增加能够更有效的阻止水分垂直向下运动和更好的吸附 NO_3^- 、 NH_4^+ ^[23],所以随着生物炭含量增加淋溶时间增长、淋出液体积和矿质氮素淋出量减少。

土壤矿质氮素的累积淋失量还受冻融作用的影响,较大的温差变化可以让土壤团粒间的孔隙处于增大、减少变化中,这必然导致土壤中矿质氮素损失^[24]。此外,冻融交替作用会使土壤孔隙中冰晶膨胀,致使大团聚体变成小团聚体,使土壤的渗透系数增加至少一倍,导致土壤孔隙度增大,土壤持水性降低,矿质氮素能够轻易从土相中游离到水相中,增大了土壤矿质氮素的淋失量^[25-26]。从图 3 可发现,随冻融循环次数的增多土壤 NO_3^- -N 最终累积淋失量也逐渐增多。但图 4 发现在冻融循环作用下施加生物炭对 NH_4^+ -N 最终累积淋失量起到先减少后增加的作用,这可能是由于生物炭呈弱碱性,进而使土

壤 pH 升高, 增加土壤阳离子交互作用, 有利于土壤对 NH_4^+ 滞留, 这也是土壤中铵态氮的固持效果好于硝态氮的原因^[27]。在 0~3 次低冻融循环次数淋滤

液体积逐渐降低, 在 5 次循环之后淋出液体积又逐渐上升, 由于淋滤液体积的变化从而导致 NH_4^+-N 最终累积淋出量呈减少—增加趋势。

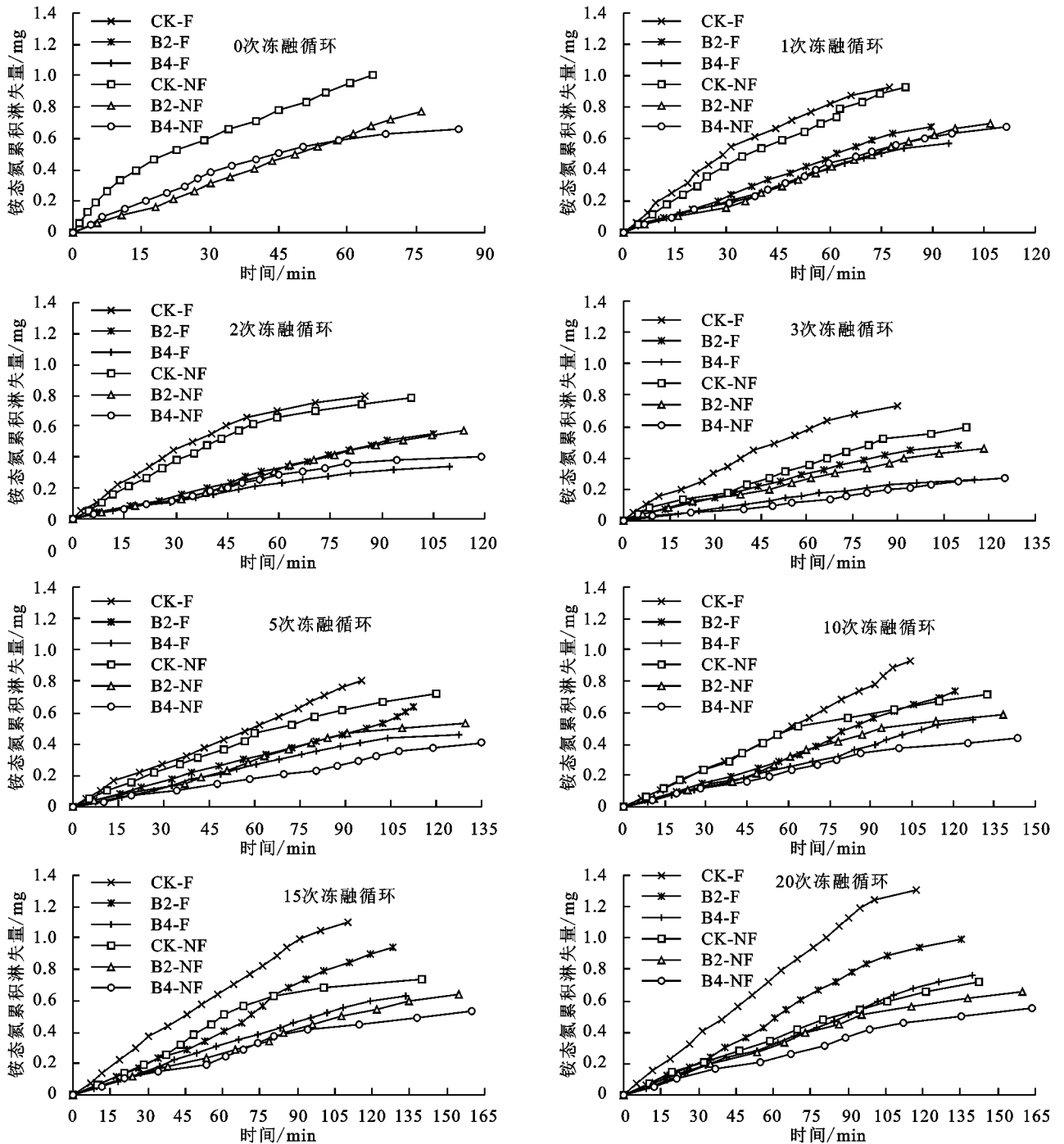


图4 冻融作用下施加生物炭对黑土铵态氮累积垂直迁移量影响

2.3 冻融作用下生物炭输入对表层土壤水溶性磷垂直迁移的影响

从图5可知, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 最终累积淋失量比 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 变化整体走势较缓。与 NH_4^+-N 不同, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 最终累积淋失量随冻融循环次数的递增出现先增加再减少的现象, 转折点同样在第5次冻融循环之后, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 最大最终累积淋失量分别为 0.27 mg(CK-F), 0.20 mg(B2-F), 0.24 mg(B4-F) 和 0.19 mg(CK-F), 0.12 mg(B2-NF), 0.15 mg(B4-

NF)。在相同冻融频次、同一生物炭施加量情况下, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 最终累积淋失量 F 组高于 NF 组。但不论冻融与不冻融, 随着生物炭的施加, 最终累积淋失量都有显著的降低, 但 B4 组最终累积淋失量大于 B2 组, 两者差值最大及最小值分别为 0.4 mg(5 次冻融组), 0.01 mg(1 次冻融组) 和 0.03 mg(5 次不冻融组), 0.01 mg(2 次不冻融组)。

冻融循环作用对土壤 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 最终累积淋失量表现为先升高再降低的趋势。在 0~5 次冻融循环

环境下升高,在 5~20 次冻融循环下降低。原因可能为:冻融循环条件下,土壤温度变化速率、通气性及土壤水分等土壤性质发生改变,有效降低了土壤有机质分解和矿化过程,进而随淋滤液淋失的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量升高^[28],另一方面土壤在经历多次冻融循环作用后,土壤中微生物对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分解速率极剧下降,从而导致 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 淋失量降低^[29]。同时生物

炭本身对土壤水溶性磷淋失具有强烈的滞留作用,可有效减少春季解冻期融雪径流对土壤水溶性磷的垂直迁移^[30];生物炭本身含磷量较高导致土壤 PO_4^{3-} 含量增加,并且随着施入量的增多导致土壤呈碱性,有利于促进 PO_4^{3-} 的淋失^[31]。因此,生物炭可以有效阻止水溶性磷的流失,但随着施入量的增大抑制效果降低。

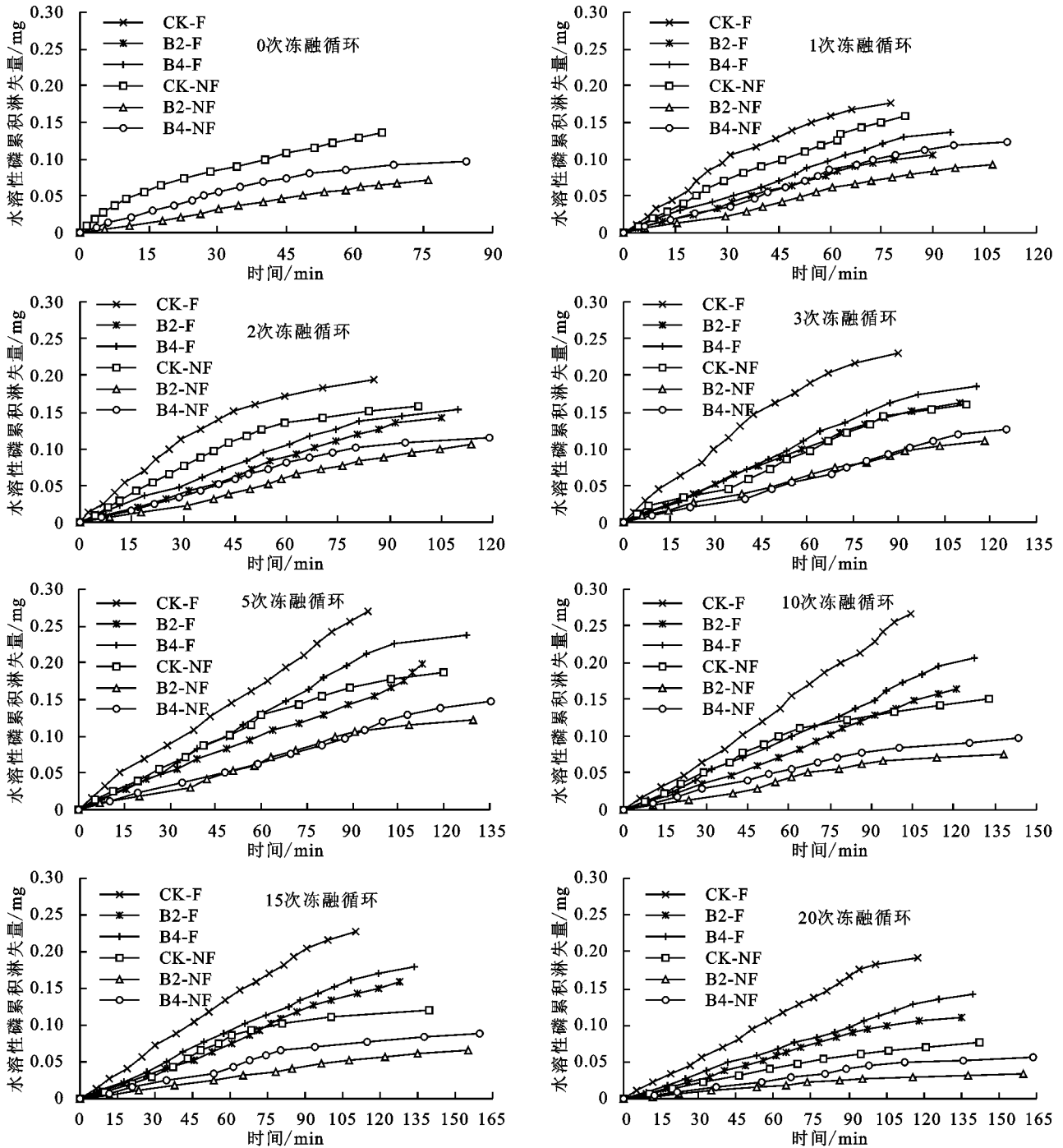


图 5 冻融作用下施加生物炭对土壤水溶性磷累积垂直迁移量影响

3 结论

(1)冻融与不冻融、冻融循环次数及生物炭施加量对黑土表层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 垂直迁移液总体积、迁移液总浓度、迁移总量均有极

显著影响。

(2)淋溶时间随冻融作用增强而缩短,随生物炭施加量增加而延长。所有处理迁移液总体积都随生物炭输入量的增加而呈降低趋势。未冻融组迁移液

总体积随培养期增加呈现缓慢下降趋势,冻融组处理迁移液总体积在第5次冻融循环试验出现急剧增加,后趋于平稳。

(3)分析冻融作用下秸秆生物炭施入对无机氮磷垂直迁移累积影响,同一控制时间内生物炭对冻融组无机氮磷垂直迁移量的抑制作用要大于不冻融组,且随生物炭施入量增加对无机氮磷垂直迁移的抑制作用增强。由于土壤物理性质的改变,冻融组 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 累积迁移量均都在第5次冻融循环左右发生急剧变化。

综上,解冻期冻融作用加快了黑土无机养分流失,使土地生产能力降低,同时造成地下水污染。生物炭的施加能有效抑制冻融期无机氮磷在土壤表层的垂直迁移,对寒冷地区面源污染防治起到积极作用。

参考文献:

[1] 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.

[2] 叶照金,廖敏,黄宇,等. 不同施肥管理模式对集雨区苗木地径流氮素流失的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(6):30-37.

[3] 范昊明,张瑞芳,周丽丽,等. 气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(6):48-53.

[4] 周丽丽,李婧楠,米彩红,等. 秸秆生物炭输入对冻融期棕壤磷有效性的影响[J]. 土壤学报,2017,54(1):171-179.

[5] 龙天渝,刘祥章,刘佳. 紫色土坡耕地硝态氮随壤中流迁移的时空分布模拟[J]. 农业环境科学学报,2015,34(10):1973-1978.

[6] 华文杏,范昊明,许秀泉,等. 东北坡耕地春季融雪侵蚀观测研究[J]. 水土保持学报,2017,31(2):92-96.

[7] 车明轩,宫渊波, Muhammad N K, 等. 不同雨强、坡度对秸秆覆盖保持水土效果的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(2):131-135,142.

[8] 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.

[9] William H, Philip R, James W. Effects of three different biochars on aggregate stability, organic carbon mobility and micronutrient bioavailability[J]. Journal of Environmental Management,2016,181:770-778.

[10] 邵婧宇. 利用 CT 扫描分析冻融作用对表层黑土和棕壤结构的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.

[11] 李德明,郭成久,宁睿. 初始含水量对黑土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(5):17-20.

[12] 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.

[13] 陈温福,张伟明,孟军. 农用生物炭研究进展与前景

[J]. 中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.

[14] 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.

[15] 郑博艺,范昊明. 东北黑土区垄作农田寒季表土水分垂直变化特征[J]. 水土保持研究,2016,23(2):28-33.

[16] 马世伟. 东北低山丘陵区季节性积雪特性研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积:GB/T 19587—2004[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[18] 周丽丽,马世伟,米彩红,等. 冻融条件下土壤水分和速效磷垂直迁移规律[J]. 水土保持研究,2017,24(3):70-74.

[19] 刘佳,范昊明,周丽丽,等. 冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J]. 水土保持学报,2009,23(6):186-189.

[20] 李婧楠. 冻融条件下不同秸秆还田方式对土壤有效磷影响研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2017.

[21] 吴媛媛,杨明义,张凤宝,等. 添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响[J]. 土壤学报,2016,53(1):81-92.

[22] 何绪生,耿增超,余雕,等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报,2011,27(2):1-7.

[23] 靖彦,陈效民,李秋霞,等. 生物质炭对红壤中硝态氮和铵态氮的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(6):265-269.

[24] 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.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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:南京农业大学,2012.

[28] 范昊明,靳雨,周丽丽,等. 冻融循环作用对黑土有效磷含量变化的影响[J]. 水土保持通报,2015,35(3):18-22.

[29] Edwards L M. The effect of alternate freezing and thawing on aggregate stability and aggregate size distribution of some Prince Edward Island soils[J]. European Journal of Soil Science,1991,42(2):193-204.

[30] David L, Pierce F, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma,2010,158(3/4):436-422.

[31] 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.