

生物炭对冻融期盐渍化土壤水热肥效应的影响

张如鑫, 屈忠义, 王丽萍, 杨 威, 刘祖汀

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探究施加生物炭对冻融期盐渍化土壤蓄水保墒、保温、保肥的作用,以盐渍化土壤为研究对象,连续 2 年在河套灌区开展田间小区原位冻融试验,设置生物炭用量为 15 t/hm² (D15), 30 t/hm² (D30), 不施加生物炭(CK)3 种处理。结果表明:在冻融条件下,0—40 cm 土层较 40—100 cm 土层水分垂直分布规律明显、储水能力强;除在试验第 1 年的初冻期施加生物炭使 0—40 cm 土层储水量有所降低外,随生物炭施加时间的增长,生物炭的持水作用逐渐显现,其中与 CK 相比 D30 处理更有利于土壤水分保持。施加生物炭可以平抑冻融期土壤温度的变幅、降低融解期土壤温度变化的离散程度,较对比,2 年冻融期 0—40 cm 土层平均温度生物炭处理提高 0.8~1.6 ℃,经过 2 年冻融过程各处理土壤冻结指数为 CK>D15>D30,融解指数为 D30>D15>CK。连续 2 年冻融期,生物炭的施入均丰富了土壤养分含量,不同程度地减少冻融各阶段 0—40 cm 土层养分流失,使冻融期土壤速效钾、碱解氮、速效磷含量增幅范围分别达到 3.1%~38.1%, 1.3%~44.6%, 5.4%~80.4%, 有机碳密度增加了 2.0%~22.4%,其中以 D30 处理提升效果最为明显。施用生物炭改善了冻融期盐渍化土壤的水热肥状况,可为来年作物的生长繁殖提供良好的环境,生物炭用量 30 t/hm² 时施用效果较优。

关键词: 生物炭; 冻融期; 盐渍土; 土壤储水量; 土壤温度; 土壤养分

中图分类号:S278

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)05-0296-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.036

Effect of Biochar on Water, Heat and Fertilizer of Saline Soil During Freezing-thawing Period

ZHANG Ruxin, QU Zhongyi, WANG Liping, YANG Wei, LIU Zuting

(Inner Mongolia Agricultural University, Water Conservancy and Civil Engineering College, Hohhot 010018)

Abstract: In order to explore the effects of biochar application on soil moisture storage, heat preservation and fertilizer conservation in saline soil during freezing-thawing period, taking saline soil as the research object, in situ freezing-thawing tests of field plots were carried out in the Hetao Irrigation Area for two consecutive years, the biochar dosages were set as 15 t/hm² (D15), 30 t/hm² (D30) and no biochar (CK). The results showed that under the freezing-thawing conditions, the vertical distribution of water in 0—40 cm soil was more obvious than that in 40—100 cm soil, and the water storage capacity was greater. In addition to the decrease of soil water storage at 0—40 cm by applying biochar in the initial freezing period of the first year of experiment, the water-holding effect of biochar gradually appeared with the increase of application time. Compared with CK, D30 treatment was more beneficial to soil water retention. Applying biochar could suppress the variation of soil temperature in freezing-thawing period and reduce the dispersion degree of soil temperature change in thawing period. Compared with the control, the average soil temperature of 0—40 cm in the freezing-thawing period of 2 years was increased by 0.8~1.6 ℃ under biochar treatment. After two years of freezing-thawing, the soil freezing index of each treatment was CK > D15 > D30, and the melting index was D30 > D15 > CK. In the freezing-thawing period, the application of biochar enriched the soil nutrient content and reduced the soil nutrient loss from 0 cm to 40 cm in various freezing-thawing stages. The contents of available K, alkali-hydrolyzable N and available P increased by 3.1%~38.1%, 1.3%~44.6% and

收稿日期:2022-02-06

资助项目:国家自然科学基金项目(51779117, 52109056);内蒙古科技厅科技计划项目(2019GG025)

第一作者:张如鑫(1995—),男,在读硕士研究生,主要从事农业水土环境研究。E-mail:874388594@qq.com

通信作者:屈忠义(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事节水理论与农田水土环境效应研究。E-mail:quzhongyi@imau.edu.cn

5.4%~80.4%, respectively. Organic carbon density increased by 2.0%~22.4%, and D30 treatment had the most obvious improvement effect. The application of biochar improved the hydrothermal fertilizer status of saline soil in freezing-thawing period, and provided a good environment for the growth and reproduction of crops in the next year. The application effect was better when the amount of biochar was 30 t/hm².

Keywords: biochar; freezing-thawing period; saline soil; soil water storage; soil temperature; soil nutrients

内蒙古河套灌区作为我国重要的粮油生产基地,土壤盐渍化较为严重,气候干旱寒冷,每年土壤冻融时间长达180天左右。近年来,随着全球气候变暖,中高纬度的积雪和土壤冻融环境将发生变化,其中水分、热量的传输、水分相变和盐分的积累等,对土壤水分、密度、温度、养分等均有不同程度的影响^[1]。首先,受季节性冻融作用影响,翌年春播农作物的底墒严重不足,融解期地表水分蒸发强度强烈,表层土壤经过反复冻融作用对整个农田土壤养分流失具有重要的影响,导致越冬作物和春播农作物因严重缺水而减产^[2];其次,冻融所形成的盐渍化会对作物生长过程产生巨大的威胁,降低土壤保水、保肥等能力^[3];再次,河套灌区利用传统秋浇使土壤冻结滞水,为来年早春作物播种提供适宜墒情,但是由于融解期上蒸下漏,致使土壤水分利用率较低。因此,在冻融期采取合理的改良措施抑制地表蒸发、提高土壤底墒,对于促进翌年作物出苗生长和提高农业水肥利用效率具有重要意义。

生物炭是一种新兴而又有效的土壤改良剂,因其较大的孔隙度和比表面积,能够改变土壤理化性质^[4],直接或间接影响土壤水热肥状况^[5],备受国内外学者广泛的关注。阎海涛等^[6]以植烟褐土为研究对象发现,施加小麦秸秆生物炭3年后土壤TOC和含水率随生物炭施加量增加而提高,但对土壤速效磷影响不显著。李昌见等^[7]选用玉米秸秆生物炭施加土壤中发现,土壤温度随着生物炭施加量增加而增加,生物炭施加量为60 t/hm²时土壤温度增幅最大。但也有研究^[8]认为,施加生物炭在改善土壤理化性质方面具有一定的副作用,原因可能是土壤类型、生物炭施加量、生物炭种类等其他环境因素不同而存在差异。孙运朋等^[9]研究滨海滩涂盐碱地土壤发现,施加7.5 t/hm²生物炭并未使土壤容重降低,且随着生物炭施用量的增加,土壤持水能力呈减小的趋势。Carvalho等^[10]研究发现,施加32 t/hm²木质生物炭降低了土壤有效水分,对水稻生长无影响。可见,生物炭的施加对土壤理化性质具有一定的影响作用。但是,在河套灌区反复的冻融作用下,施入生物炭后对盐渍化土壤水热肥有何影响,冻融作用下生物炭是否能很好地起到对土壤改良的作用,目前尚缺少相关研究。

针对河套灌区典型冬季较长、次生盐渍化等问

题,在内蒙古河套灌区进行田间小区原位控制试验,探究施加生物炭对冻融期盐渍化土壤水热肥的影响,为改善干旱地区土壤提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2019年11月至2021年4月在内蒙古巴彦淖尔市五原县田间小区进行(40°46′30″—41°16′45″N, 107°35′70″—108°37′50″E)。五原县位于内蒙古河套平原腹地,属于典型的温带大陆性气候,气候干燥,土壤封冻期长,且冬春季土壤盐分表聚现象严重。年均气温6.1℃,极端最低气温-36.7℃,年均降水量177 mm,无霜期117~136天。太阳年平均辐射总量为153.44 kcal/cm²,全年日照时间3 230.9 h,冻融期日照时间占全年的44%。平均最低地温-12.3℃,冻土深度为100~130 cm,土壤11月初进入初冻期,冻层全部融化在翌年4月中旬左右。试验期积雪厚度、气温见图1。

试验开始前选取5个1 m×1 m样方,去除表层植物碎屑等杂物,使用土钻采集0—40 cm的土壤样品,样品经自然风干过筛后,测其基础理化性质。供试生物炭为辽宁金和福农业开发有限公司的玉米秸秆生物炭产品,该生物炭在360℃厌氧条件下热解处理制备而成。土壤和生物炭基本性质见表1。

1.2 试验设计

根据关于生物炭对农田土壤性状和作物生长的影响研究结果^[11-12],本试验设置2种不同用量生物炭处理,分别是15 t/hm²(D15)和30 t/hm²(D30)的生物炭,以不施加生物炭的小区为对照(CK)。每个处理包括对照设置3个重复,共9个小区,完全随机区组排列。小区面积为160 m²(40 m×4 m),其四周均设置2 m宽的保护行。2019年10月15日将生物炭一次性均匀挥洒在试验小区上,使用旋耕机将其与30 cm土层土壤均匀混合,之后不再施加生物炭。试验田2020年4月25日进行春季灌水压盐,灌溉定额为150 m³/667 m²,灌水方式为地面灌溉,以黄河水为灌溉水源,pH为8.76,矿化度为1.88 g/L, Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺+K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻含量分别为70.1, 79.0, 37.5, 106.4, 264.2, 183.1 mg/kg。播前进行人工耕翻,深度约30 cm,并施入磷酸二胺(N质量分数18%, P质量分数46%) 450 kg/hm²和复合肥(N质量分数15%, P质量分数15%, K质量分数15%) 337.5 kg/

hm²作为底肥。病虫害害化学防治以及其他田间管理措施同当地作物高产管理一致。

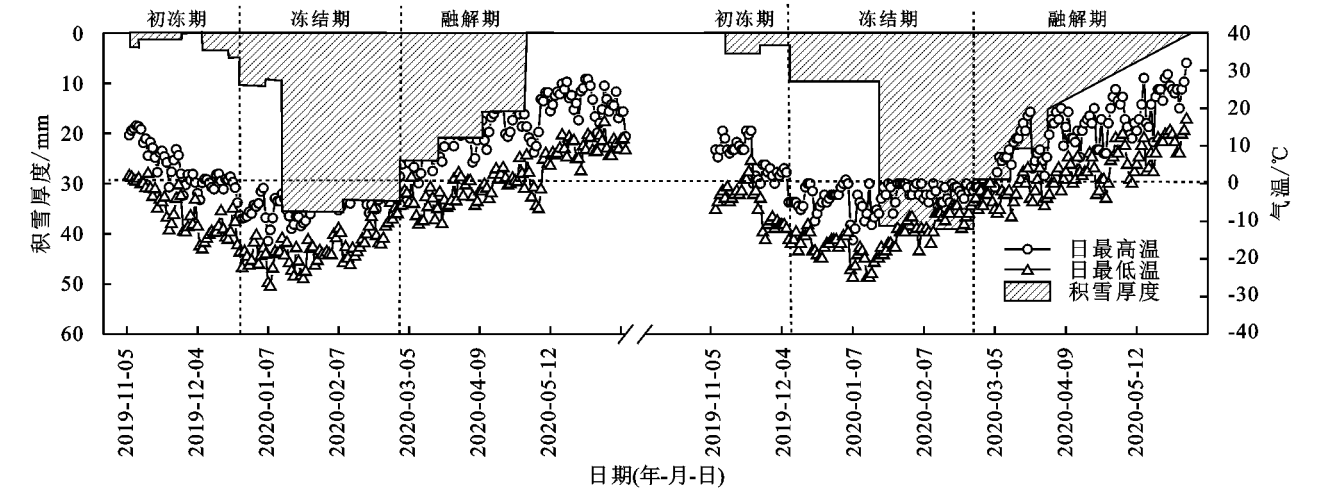


图 1 试验期间日最高气温、日最低气温、积雪厚度

表 1 供试土壤和生物炭基础性质

参数	土壤	pH	EC/ (mS·m ⁻¹)	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	碳含量/ (g·kg ⁻¹)	氮含量/ (g·kg ⁻¹)	粒径质量分数/%		
	质地										砂粒	粉粒	黏粒
土壤	粉质壤土	8.87	1.88	7.56	12.33	7.53	351.50	58.91			16.70	79.03	4.27
生物炭		8.75				307.52	786.50	401.94	364.07	7.56			

因不同冻融条件对土壤理化性质的影响程度存在差异,为更准确分析冻融期各个阶段土壤水热肥状况,参考往年气象数据,特将冻融期具体划分 3 个阶段:初冻期、冻结期和融解期^[13]。日最低气温开始达到 0℃以下至土壤表层开始冻结阶段为初冻期;当日最低、最高气温均达到 0℃以下,冻结锋面快速向下移动至土壤达到最大冻结深度,且积雪不再消融阶段为冻结期;日最高气温达到 0℃以上积雪开始融化,土层从上到下开始解冻至全部解冻阶段为融解期。

试验经过 2 个冻融期,每个冻融期相对应阶段及其具体日期为:初冻期 2019 年 11 月 5 日至 2019 年 12 月 16 日(42 天)、冻结期 2019 年 12 月 17 日至 2020 年 2 月 21 日(67 天)、融解期 2020 年 2 月 22 日至 2020 年 4 月 15 日(54 天),冻融历时 163 天。初冻期 2020 年 11 月 2 日至 2020 年 12 月 2 日(31 天)、冻结期 2020 年 12 月 3 日至 2021 年 2 月 28 日(88 天)、融解期 2021 年 03 月 1 日至 2021 年 4 月 5 日(36 天),冻融历时 155 天。

1.3 测定指标与方法

土样采集频率设定为:土壤冻结期大约每 20 天进行 1 次取样。初冻期和融解期由于当地气候昼夜温差较大,此阶段的土壤处于冻融状态,土壤水热肥状况波动较大,因此加密取样,采集频率设定为大约每 10 天 1 次。当冻融期有积雪覆盖时,选取积雪厚度一致区域进行取样,取样前用铲子将表层积雪清理干净,取样结束后将积雪再次覆盖。根据已有研究^[14]发现,该研究区土壤容重的年际变化并不明显,

加之冬季取样困难,特将土壤容重的取样次数设定为:初冻期、冻结期、融解期各 2 次。

1.3.1 土壤含水率和容重 土壤样品采用土芯法采集,使用手持式动力取样器采集深度 0—100 cm 土层土壤,每 20 cm 为 1 层,重复 3 次。取出原状土后立即将土壤样本放入铝盒内,使用烘干法测定各层土壤质量含水率、通过计算单位体积(100 cm³)环刀中的烘干土质量测定土壤容重。计算 0—20, 20—40 cm 土层土壤储水量,计算公式为:

$$W_i=10\cdot h_i\cdot \gamma_i\cdot \theta_i$$
 (1)

式中:W_i为第 i 层土壤储水量(mm);h_i为第 i 层土壤厚度(cm);γ_i为第 i 层土壤干容重(g/cm³);θ_i为第 i 层土壤质量含水率(%)。

1.3.2 土壤温度 采用多通道土壤温度传感器(TM-03, 邯郸市若腾电子科技有限公司)对 0—40 cm 土壤温度进行监测,监测时间间隔设定为 4 h/次,试验期末读取数据。采用离散法进行计算土壤冻融指数,冻融指数分为地表冻融指数和空气冻融指数,由逐日观测的温度数据计算得出。计算公式为:

$$I_F=\sum_{i=1}^{N_F}|T_i| \quad (T_i<0\text{ }^{\circ}\text{C})$$
 (2)

$$I_T=\sum_{i=1}^{N_T}T_i \quad (T_i>0\text{ }^{\circ}\text{C})$$
 (3)

式中:I_F为冻结指数(℃·d);I_T为融化指数(℃·d);N_F为年内温度低于冻结点的日数(d);T_i为日平均地表温度(℃)。

1.3.3 土壤养分 在冻融期采用土钻进行多点采集

深度为 0—40 cm 土层土壤。土样经自然风干后人工研磨,采用紫外可见分光光度计以及火焰光度计测定土壤速效磷和速效钾含量;采用 1.0 mol/L NaOH 碱解扩散法测定土壤碱解氮含量;采用重铬酸钾容量法测定土壤有机碳含量,并计算某土层 i 的有机碳密度(D_{soci}),计算公式为

$$D_{soci}=\frac{C_iD_iE_i}{100}$$

(4)

式中: C_i 为第 i 层土壤有机碳含量(kg/m²); D_i 为第 i 层土壤容重(g/cm³); E_i 为第 i 层土层厚度(cm)。

1.4 统计分析

数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 25.0 软件运用 LSD 法进行差异显著性检验($p<0.05$),整理分析,使用 Origin 9.1 和 Surfer 12 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 施加生物炭对土壤水分的影响

2.1.1 土壤储水量动态变化特征 试验期间各处理土壤储水量见表 2。对于 2 年冻融期,各个阶段 20—40 cm 土层的土壤储水能力均优于 0—20 cm 土层。初冻

期和融解期是土壤储水量最高的时期,冻结期土壤储水量处于较低水平。可能是因为冻结期因土壤完全冻结且无外界水源,各处理土壤储水量较低;融解期由于积雪融化水和土壤解冻水的补给,土壤储水量最大。

施加生物炭对冻融各阶段土壤储水量均有不同程度的影响。试验初期各处理的土壤储水量无显著性差异,甚至在初冻期 CK 小区具有较高的持水性,但随生物炭施加时间的增长,生物炭的持水作用逐渐显现。第 1 年冻结期(0—20 cm)和融解期(20—40 cm),D30 处理的土壤储水量较 CK 分别显著提高了 15.72%和 13.71%。翌年初冻期(0—20 cm 土层),CK 小区的土壤储水量比 D15 和 D30 分别减少 1.41, 5.87 mm。除第 1 年冻结期 0—20 cm 土层 D30 处理外,其他时期各土层冻结期土壤水分散失不明显,各处理间土壤储水量差异不显著,但生物炭处理较对照均提高了土壤储水量。融解期 D30 处理储水能力最佳,在 0—20,20—40 cm 土层,较 CK 相比,分别提高土壤储水量 6.77,7.97 mm。总体来看,生物炭对 2 年冻融期土壤储水量具有一定的提高效果。

表 2 表层土壤储水量动态变化

年份	处理	初冻期储水量/mm		冻结期储水量/mm		融解期储水量/mm	
		0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
2019—2020	CK	59.75a	77.35a	47.71b	70.80a	60.85a	75.58b
	D15	56.88a	73.16a	47.86b	75.12a	62.77a	76.07b
	D30	57.49a	75.85a	55.21a	73.65a	63.92a	85.94a
2020—2021	CK	51.11b	60.16a	41.90a	48.24a	49.94b	57.26b
	D15	52.52ab	61.82a	42.35a	50.94a	52.41ab	60.79ab
	D30	56.98a	63.21a	42.82a	51.13a	56.71a	65.23a

注:同列不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达到 $p<0.05$ 显著水平。

2.1.2 土壤含水率剖面分布特征 由图 2 可知,各处理土壤含水率剖面分布特征整体表现为上干下湿的特点。0—40 cm 土层各处理土壤含水率空间分布规律较为明显,而 40—100 cm 土层各处理土壤含水率空间分布无明显规律。初冻期各处理的土壤水分主要集中在 40—80 cm 土层,表层和深层土壤水分较低,且对照小区低于生物炭处理。冻结期 0—40 cm 土层土壤水分整体呈现较低水平,土壤含水率从大到小依次为 D30>D15>CK。当冻融作用持续到 120 天左右时,气温上升致使积雪融化,此时处于土壤融解期,土壤含水率随土层深度增加而增加,且生物炭处理的土壤含水率与对照相比均有所提高;此外,在融解期 40—80 cm 土层土壤含水率的等值线在空间上变化剧烈且密集,说明在该土层土壤含水率梯度变化较大。

2.2 施加生物炭对土壤温度的影响

2.2.1 土壤温度动态变化特征 由图 3 可知,施加生物炭可以有效减缓冻融期各土层温度的波动幅度。

2 年冻融期,CK 小区 0—40 cm 的土壤平均温度比 D15 和 D30 分别降低了 0.83,1.64 ℃。较 CK 相比,在初冻期生物炭处理的平均土壤温度提高 0.80~1.33 ℃,冻结期提高 1.30~2.05 ℃,融解期提高 0.18~0.35 ℃。此外,在融解期各处理平均土壤温度对应的箱线图较长,说明此阶段土壤温度变化幅度较大,其中在第 1 年融解期 CK、D15 和 D30 的变异系数分别为 9.81%,3.38%,3.37%,翌年融解期分别为 5.85%,1.90%,2.30%,生物炭处理的温度变异幅度均小于对照处理,说明生物炭可以有效地降低土壤温度变化的离散程度。

2.2.2 土壤冻融指数的变化特征 土壤冻融指数的变化,能够从不同方面反映土壤水分和热量的分布、迁移和传输规律。由图 4 可知,2 年冻融期冻结指数均为 CK>D15>D30,施加生物炭后土壤水热状况均有所提升致使土壤热容量增加,D15 和 D30 的 0—40 cm 冻结指数比 CK 分别减少 98.17,170.89 ℃·d。第 1 年

冻融期土壤融化指数大小为 D15(283.50 °C · d) > D30(275.96 °C · d) > CK(236.14 °C · d), 翌年冻融期为 D30(139.63 °C · d) > D15(105.66 °C · d) > CK(79.49 °C · d)。整体来看,生物炭的施入使冻融期土壤融化指数有所提高,表明施加生物炭使土壤冻融期间的最大融化深度增加、土壤水分调蓄空间变大以及调蓄能力有所增强。

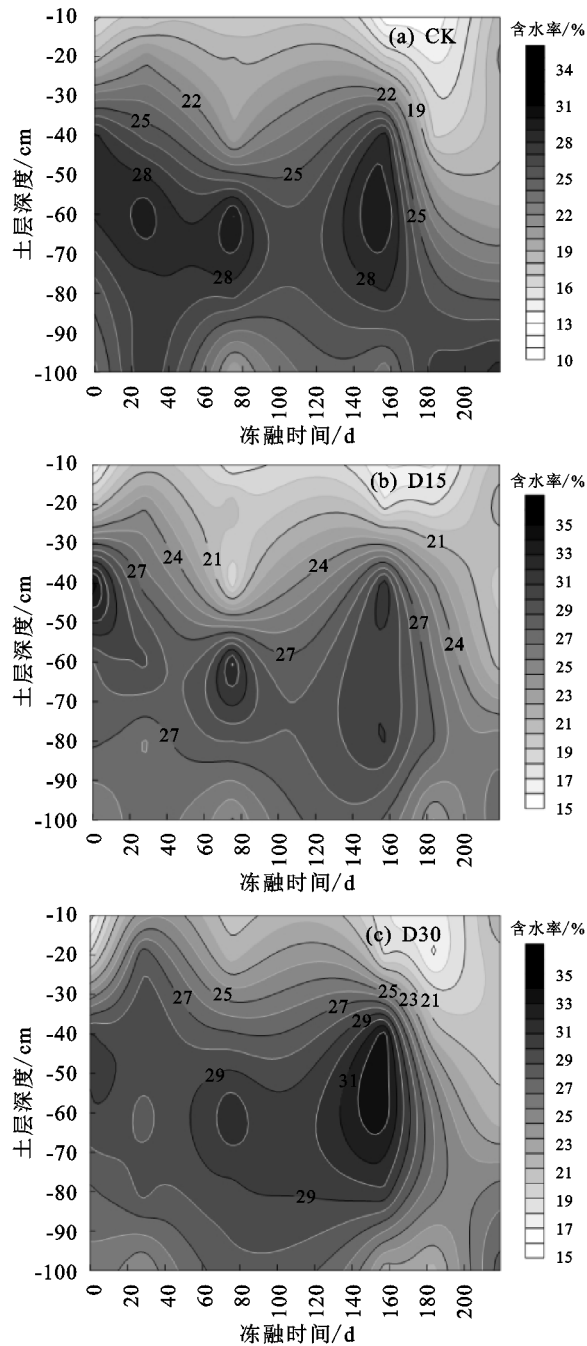


图 2 冻融期不同处理 0—100 cm 土层土壤含水率空间分布

2.3 施加生物炭对土壤养分的影响

2.3.1 土壤速效磷钾和碱解氮含量变化特征 由表 3 可知,0—20 cm 土层土壤速效钾含量高于 20—40 cm 土层,且施加生物炭在不同程度上提高了各土层土壤速效钾含量。较对照比,生物炭处理显著提高了第 1 年初

冻期(0—20,20—40 cm)和冻结期(20—40 cm)土壤速效钾含量;在融解期 D30 处理显著提高 0—20,20—40 cm 土层速效钾含量,增幅分别达到 13.71% 和 15.11%。翌年冻融期,与对照相比,生物炭处理均提高了土壤速效钾含量,其中 D30 处理与 CK 间达到显著,初冻期 0—20 cm 土层增幅为 38.07%,冻结期 20—40 cm 土层增幅为 17.34%,融解期 0—20,20—40 cm 土层增幅分别为 13.05% 和 14.00%。施加生物炭提高了 0—40 cm 土层土壤碱解氮含量,其中 2 年冻融期均以 D30 增幅最大,在 0—20,20—40 cm 土层,初冻期最大增加值分别为 21.28,13.50 mg/kg,冻结期分别为 24.32,16.17 mg/kg,融解期分别为 36.27,21.03 mg/kg。分析各处理各土层土壤速效磷含量得出,在试验第 1 年冻融期,除 D15 处理(20—40 cm 土层)与 CK 间未达到显著水平,其余各时期各处理均与对照达到显著水平;在翌年初冻期、冻结期和融解期,各土层生物炭处理与对照均达到显著水平,增幅大小表现为 D30 > D15 > CK。可见,生物炭的施入对 2 年冻融期土壤速效钾、碱解氮和速效磷含量均具有提高作用,以 D30 处理较优。

2.3.2 土壤有机碳密度变化特征 由表 4 可知,0—40 cm 土层生物炭处理较对照均有所提高,且各处理 0—20 cm 土层土壤有机碳密度均高于 20—40 cm 土层。生物炭施加后第 1 年,对于 0—20 cm 土层,D15 和 D30 较 CK 在初冻期、冻结期和融解期分别提高 8.14%,2.01%,18.07%,11.76%,11.41%,11.45%。20—40 cm 土层与 0—20 cm 土层规律相似,其中 D30 较 CK 在融解期提高土壤有机碳密度增幅最大,达到 22.38%。试验第 2 年较第 1 年各处理土壤有机碳密度变化无显著差别,各处理各土层生物炭处理较对照均达到差异显著。

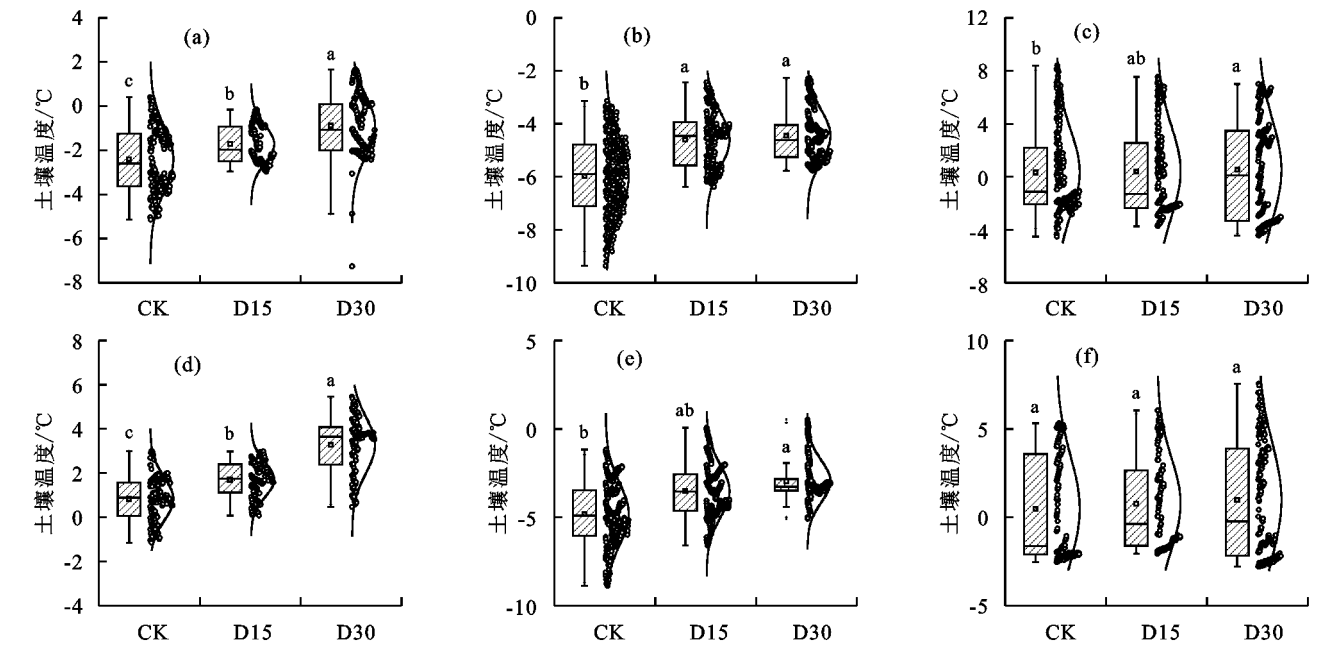
3 讨论

3.1 施加生物炭对土壤水分的影响

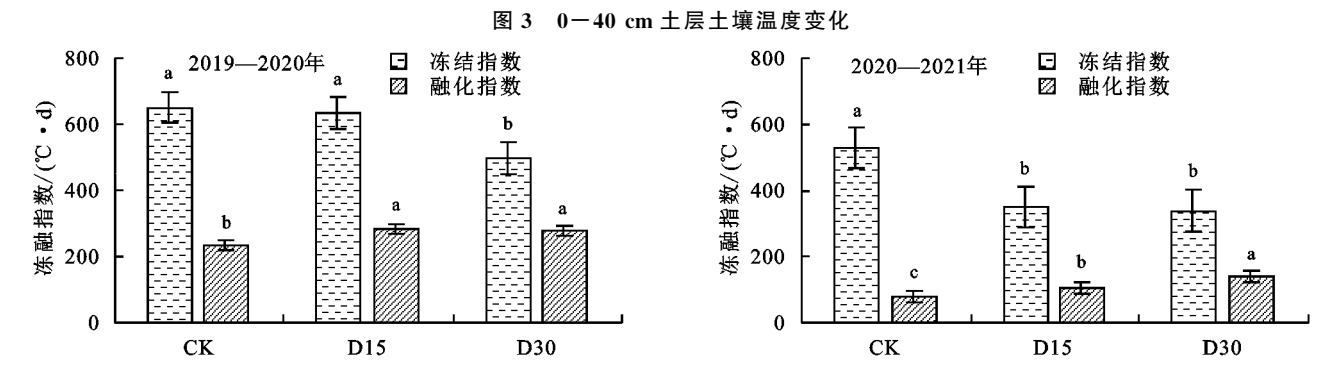
已有研究^[4-5]表明,生物炭可以改变土壤的理化结构,从而起到大幅节水保墒的功效。本研究发现,施加生物炭可以提升 2 年冻融期 0—40 cm 土层土壤储水量。一般来说,生物炭主要通过 2 种方式影响土壤水分状况,直接影响是生物炭作为一种多孔介质所特有的多孔隙和强大的吸附性能可以直接吸附土壤水分,增加土壤储水量;间接影响是添加到土壤中的生物炭会与其他土壤成分结合,进而改善土壤结构,从而增加土壤的持水量^[15]。对于整个试验周期来讲,生物炭提高土壤储水量的效果并不显著,甚至在初期施加生物炭会导致土壤储水量下降,在试验中期

和后期生物炭处理下的土壤储水量才变化明显。这可能是因为河套灌区属于干旱一半干旱地区,降水稀少、蒸发强烈、地表水资源严重匮乏,试验所在地全年降水较低,土壤长期处于寒旱状态,在干燥的土壤中生物炭的持水性能对土壤中水分含量具有较强的敏感性。试验前期土壤中水分较少,生物炭的保水性无法发挥作用,但随着土壤水分运动和积雪融化等因素的影响,生物炭的保水能力逐渐发挥^[16],其中在融解期土壤中水分

不断蒸发,生物炭的微空隙使更多的水处于毛细状态得到了较好的保持,蒸发散失难度加大,进而达到抑制土壤水分蒸发的效果^[17],使土壤中水分得到有效的储存。此外,生物炭对耕层土壤保水蓄水的效果较深层好,这是由于本试验的生物炭仅施加至 30 cm 土层处,生物炭可以将吸附的水分传递给该土层土壤,使储水量减小的速率较缓,而深层土壤与表层距离较远,受生物炭的影响不大。



注:图(a)~(c)分别为 2019—2020 年初冻期、冻结期和融解期;图(d)~(f)分别为 2020—2021 年初冻期、冻结期和融解期。箱线图中箱体上一表示均值,箱体表示 25%~75%,误差线表示最大值和最小值。图柱上方不同小写字母不同表示同一时期不同处理间差异达到 $p < 0.05$ 显著水平。下同。



注:图柱上方不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

图 3 0—40 cm 土层土壤温度变化

图 4 冻融期不同处理土壤冻融指数的变化

3.2 施加生物炭对土壤温度的影响

已有研究^[18]表明,生物炭可明显调节土壤温度。本试验发现,添加生物炭有效降低整个冻融期 0—40 cm 土层土壤温度变化幅度,一方面是由于施加生物炭后土壤颜色较深,形成了反射率较低且颜色较深土层,土壤吸收能量增强,并且生物炭具有降低土壤容重和热导率的作用^[19];另一方面,是因为由于生物炭的多孔结构为微生物的生存提供了有利的场所,温度升高,激发微生物活性,大量的微生物活动释放相应

较多的热量,从而辅助土壤加快升温过程。

3.3 施加生物炭对土壤养分的影响

土壤中有有效的养分含量对土壤肥力具有重要作用,施加合理的改良措施若能减少土壤养分的流失,对作物的生长具有重要意义。生物炭由于自身含碳量高及呈碱性的特性,对土壤养分具有一定的影响^[20]。分析发现,施加生物炭丰富了土壤碱解氮、速效磷钾养分含量,且效果逐年显著。胡敏等^[14]和高利华等^[21]分析河套灌区盐渍土壤也发现,施加玉米

秸秆生物炭有效地提高了土壤碱解氮、速效磷钾等养分的含量。一方面原因是本研究所用到的生物炭含有较高的养分(速效磷 307.52 mg/kg,速效钾 786.50 mg/kg,碱解氮 401.94 mg/kg)能够向土壤提供氮、磷、钾等矿质元素;另一方面原因是生物炭具有改善

土壤结构的功能,如增加土壤孔隙度降低土壤容重等,能够有效地吸附土壤中有有机分子,促使小分子聚合成养分大分子,从而提高了土壤对养分的吸收能力^[22]。总体而言,施加生物炭可有效地改善土壤环境,提高冻融土壤肥力。

表 3 表层土壤养分含量变化

年份	处理	土层 深度/cm	速效钾/(mg·kg ⁻¹)			碱解氮/(mg·kg ⁻¹)			速效磷/(mg·kg ⁻¹)		
			初冻期	冻结期	融解期	初冻期	冻结期	融解期	初冻期	冻结期	融解期
2019—2020	CK	0—20	391.94b	311.54a	290.00b	94.08b	64.81b	75.19b	9.56b	10.28b	8.84b
		20—40	270.06b	205.00b	247.17b	65.24b	49.19b	55.72c	3.74b	6.84b	2.72b
	D15	0—20	452.51a	333.25a	310.34ab	102.98a	95.46a	88.16a	10.91a	14.23a	10.93a
		20—40	313.25a	230.83a	279.50a	77.51a	52.14ab	64.65b	3.94b	7.45ab	2.98ab
	D30	0—20	447.25a	335.42a	329.75a	114.95a	93.68a	94.84a	11.98a	13.59a	10.77a
		20—40	300.63a	228.67a	284.51a	78.74a	55.76a	74.09a	4.32a	7.90a	3.03a
2020—2021	CK	0—20	335.53b	412.76a	397.38b	49.97b	91.04b	97.99b	7.25b	10.23c	5.48b
		20—40	283.50a	278.88b	310.75b	38.51b	75.19b	52.80b	2.55b	7.09c	3.43b
	D15	0—20	428.85a	420.07a	448.75a	68.48a	112.64a	118.40a	9.78a	13.85b	6.90a
		20—40	292.36a	306.25ab	326.51ab	42.54b	76.20b	70.53a	4.52a	8.23b	5.00a
	D30	0—20	463.27a	445.32a	449.38a	71.25a	115.36a	134.26a	9.98a	16.22a	7.09a
		20—40	309.24a	327.25a	354.25a	48.16a	91.36a	73.83a	4.60a	11.49a	5.18a

注:同列不同小写字母表示同一时期同一土层不同处理间差异达到 $p<0.05$ 显著水平。

表 4 试验期不同处理土壤有机碳密度

年份	处理	土层 深度/cm	有机碳密度/(kg·cm ⁻²)		
			初冻期	冻结期	融解期
2019—2020	CK	0—20	2.21b	1.49b	1.66b
		20—40	1.52a	1.39a	1.43b
	D15	0—20	2.39ab	1.52a	1.96a
		20—40	1.58a	1.41ab	1.63a
	D30	0—20	2.47a	1.66a	1.85a
		20—40	1.68a	1.48a	1.75a
2020—2021	CK	0—20	1.87c	1.94c	2.14c
		20—40	1.67c	1.91c	1.71b
	D15	0—20	2.05b	2.13a	2.38a
		20—40	1.77b	2.02b	1.81a
	D30	0—20	2.21a	2.14b	2.43b
		20—40	2.04a	1.99a	1.95a

注:同列不同小写字母表示同一时期同一土层不同处理间差异达到 $p<0.05$ 显著水平。

土壤有机碳是通过微生物作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体的合称。与对照比,生物炭处理均提高了土壤有机碳密度。一方面,由于生物炭本身是一种富碳材料,能够向土壤中输入大量外源有机碳^[23];另一方面,生物炭能够改变土壤结构,促进土壤腐殖质的形成,有助于碳水化合物、芳香烃等有机大分子的形成,使土壤有机碳含量提高^[24]。本研究还发现,0—20 cm 土层土壤有机碳密度均高于 20—40 cm 土层土壤。张浩等^[25]研究典型红壤侵蚀区不同植被恢复年限的表层和深层土壤有机碳矿化特征

也发现,表层土壤有机碳密度显著高于深层土壤,分析的原因是表层土壤有机碳恢复较快,而深层土壤有机碳积累较慢。但是,也有研究^[26]表明,表层土壤微生物生物量显著高于深层土壤,微生物会产生更多的土壤酶对 SOC 进行分解,因此表层土壤有机碳密度较深层低。产生差异的原因可能是冻融期土壤微生物活性较低以及土壤类型等其他环境因素不同导致的,具体原因还需进行深度研究。

4 结 论

(1)冻融条件下,0—40 cm 土壤较 40—100 cm 土壤水分垂直分布规律明显、储水能力强;生物炭施入初期对冻融期 0—40 cm 土壤储水量影响不显著,但随生物炭施加时间的增长,生物炭的持水作用逐渐显现,其中 D30 处理更有利于土壤水分保持。

(2)施加生物炭可以平抑冻融期土壤温度的变幅、降低融解期土壤温度变化的离散程度,较对照比,2 年冻融期,生物炭处理使 0—40 cm 土壤平均温度提高 0.8~1.6 ℃;各处理的土壤冻结指数为 CK>D15>D30,融解指数为 D30>D15>CK。

(3)整个冻融期,添加生物炭增加了土壤养分和有机碳含量,使冻融期土壤速效钾、碱解氮、速效磷含量和有机碳密度分别增加 3.1%~38.1%,1.3%~44.6%,5.4%~80.4%,2.0%~22.4%,其中施加 30 t/hm²生物炭量效果较优。

参考文献:

- [1] Abbott B W, Jones J B. Permafrost collapse alters soil carbon stocks, respiration, CH_4 , and N_2O in upland tundra [J]. *Global Change Biology*, 2016, 21(12): 4570-4587.
- [2] 单小琴. 季节性冻融期不同水肥及覆盖下土壤水热动态变化规律的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [3] 屈忠义, 胡敏, 王丽萍, 等. 不同改良措施对盐渍化土壤水热碳与葵花产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(3): 268-275.
- [4] 刘园, Khan M J, 靳海洋, 等. 秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 849-858.
- [5] 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.
- [6] 阎海涛, 殷全玉, 丁松爽, 等. 生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2018, (5): 2412-2419.
- [7] 李昌见, 屈忠义, 勾芒芒, 等. 生物炭对土壤水肥热效应的影响试验研究[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1141-1147.
- [8] Singla A, Iwasa H, Inubushi K. Effect of biogas digested slurry based-biochar and digested liquid on N_2O , CO_2 flux and crop yield for three continuous cropping cycles of komatsuna (*Brassica rapa* var. perviridis) [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(8): 1201-1209.
- [9] 孙运朋, 杨劲松, 姚荣江, 等. 生物炭和黄腐酸对滨海滩涂盐碱地土壤性质的提升[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(8): 115-121.
- [10] Carvalho M T M, Madari B E, Bastiaans L, et al. Properties of a clay soil from 1.5 to 3.5 years after biochar application and the impact on rice yield [J]. *Geoderma*, 2016, 276: 7-18.
- [11] 屈忠义, 高利华, 李昌见, 等. 秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 111-118.
- [12] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭与化肥互作对土壤含水率与番茄产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 283-288.
- [13] 陈哲, 韩瑞芸, 杨世琦, 等. 东北季节性冻融农田土壤 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 通量特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 387-395.
- [14] 胡敏, 屈忠义, 王丽萍, 等. 不同改良剂对河套灌区盐渍化土壤性状和葵花生长特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 316-322.
- [15] Kumari K, Moldrup P, Paradelo M, et al. Effects of biochar on air and water permeability and colloid and phosphorus leaching in soils from a natural calcium carbonate gradient [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(2): 647-657.
- [16] 苏旭, 栾策, 吴奇, 等. 生物炭对玉米/大豆、玉米/花生间作系统土壤水肥热及产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(1): 115-122.
- [17] Uzoma K, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2): 205-212.
- [18] Wang Q K, Liu S G, Wang Y P, et al. Influences of N deposition on soil microbial respiration and its temperature sensitivity depend on N type in a temperate forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 260/261: 240-246.
- [19] Zhang Q Z, Wang Y D, Wu Y F, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(5): 1478-1487.
- [20] 魏永霞, 石国新, 冯超, 等. 黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(5): 285-294.
- [21] 高利华, 屈忠义. 膜下滴灌条件下生物炭对土壤水热肥效应的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(3): 614-620.
- [22] 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.
- [23] 高梦雨, 江彤, 韩晓日, 等. 施用炭基肥及生物炭对棕壤有机碳组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2126-2135.
- [24] 花莉, 金素素, 洛晶晶. 生物质炭输入对土壤微域特征及土壤腐殖质的作用效应研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(11): 1795-1799.
- [25] 张浩, 吕茂奎, 江军, 等. 侵蚀红壤区植被恢复对表层与深层土壤有机碳矿化的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 244-249, 314.
- [26] 王晓峰, 汪思龙, 张伟东. 杉木凋落物对土壤有机碳分解及微生物生物量碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2393-2398.