

非灌溉季节施加生物炭对滴灌棉田土壤结构及水热特性的影响

邹瑞晗^{1,2}, 吕德生^{1,2}, 王振华^{1,2}, 朱艳^{1,2}, 宗睿^{1,2}

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000;2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘要:为探究在非灌溉季节施加生物炭对滴灌棉田耕层土壤水热特性和三相结构的调控效应。设置生物炭 15(B₁),30(B₂),45(B₃),60(B₄),0(B₀) t/hm² 5个施加量,分析其对新疆滴灌棉田非灌溉季节耕层土壤(0—40 cm)三相结构、总孔隙度、土壤温度和土壤含水率的影响。结果表明:与对照处理相比,施炭处理使土壤固相体积降低 2.58%~10.74%,总孔隙度增加 3.38%~12.05%;同时,施炭处理的融后土壤质量含水率较对照处理提高 1.07%~2.65%;施炭处理的土壤导热系数降低,土壤耕层最低温度增加 0.34~2.15℃,最大温差缩小 0.47~2.14℃。基于以上土壤结构和水热特性指标进行主成分分析得出,综合得分最高的处理为 B₃,其次为 B₂。非灌溉季节施加生物炭有利于改善土壤三相结构,增加土壤总孔隙度,增强土壤保墒保温能力。新疆滴灌棉田非灌溉季节生物炭最佳施用量为 30~45 t/hm²。

关键词:生物炭;非灌溉季节;滴灌棉田;土壤三相结构;土壤水热特性

中图分类号:S156.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)03-0220-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.032

Effects of Biochar Application During the Non-irrigation Season on Soil Structure and Hydrothermal Characteristics in Drip Irrigated Cotton Field

ZOU Ruihan^{1,2}, LÜ Desheng^{1,2}, WANG Zhenhua^{1,2}, ZHU Yan^{1,2}, ZONG Rui^{1,2}

(1.School of Water Conservancy and Construction Engineering, Shihezi University, Shihezi,

Xinjiang 832000; 2.Key Laboratory of Modern Water Saving Irrigation Corps, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: This study aimed to investigate the effect of biochar application on the soil hydrothermal characteristics and three-phase structure in the cultivated layer of drip irrigated cotton fields during the non-irrigation season. Five biochar application amounts, 15 (B₁), 30 (B₂), 45 (B₃), 60 (B₄) and 0 (B₀) t/hm², were set to analyze their effects on the three-phase structure, total porosity, soil temperature and soil moisture content of topsoil (0—40 cm) in non-irrigation season of drip irrigation cotton field in Xinjiang. After the non-irrigation season, compared with the control, the soil solid volume decreased by 2.58%~10.74% and the total porosity increased by 3.38%~12.05%. At the same time, the soil moisture contents of carbon application treatments increased by 1.07%~2.65% compared with the control. The soil thermal conductivity decreased, and the soil thermal insulation effect increased. The minimum temperature of soil plough layer in non-irrigation season increased by 0.34~2.15℃, and the maximum temperature difference decreased by 0.47~2.14℃. In addition, based on the above soil structure and hydrothermal characteristics of principal component analysis, the highest comprehensive score was B₃, followed by B₂. In conclusion, biochar application in non-irrigation season was beneficial to improve soil three-phase structure, increase soil total porosity and enhance soil moisture and heat preservation ability. The best application amount of biochar in non-irrigation season of drip irrigation cotton field in Xinjiang should be 30~45 t/hm².

Keywords: biochar; non-irrigation season; drip irrigated cotton fields; soil three-phase structure; soil hydrothermal characteristics

土壤生产能力的合理补偿与良性循环利用是确保旱作区农业增产的关键技术。新疆是我国典型的

干旱绿洲区,绿洲农业正处于由传统农业向现代农业过渡的时期,高强度的土地资源开发加之原本脆弱的

收稿日期:2021-10-13

资助项目:国家自然科学基金项目(51869027);兵团重大科技项目(2021AA003)

第一作者:邹瑞晗(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事干旱区节水灌溉技术与理论研究。E-mail:zouruihan@stu.shzu.edu.cn

通信作者:吕德生(1964—),男,博士,教授,主要从事干旱区节水灌溉技术与理论研究。E-mail:ldsldsxj@163.com

生态环境使得绿洲土壤贫瘠化、沙化、盐碱化现象愈发严重,土壤结构随之变差,退化现象严重。北疆也是我国典型的季节性冻土区,非灌溉季节的冻融过程对棉田土壤的侵蚀会破坏土壤环境,降低土壤生产力^[1]。因此,促进土壤聚温保墒,降低冻融作用产生的侵蚀影响,改善土壤结构对滴灌棉田的可持续利用至关重要。

土壤中许多生物物理和化学过程,如 CO_2 排放、有机物分解和植物生长等均与土壤水分条件有关^[2]。土壤温度则通过影响农田土壤水分状况、碳平衡、养分吸收与利用、微生物以及酶活性等,进而影响作物的生长发育状况^[3]。生物炭具有孔隙结构多、高阳离子交换量和大比表面积的特点,其特殊的结构和稳定性,在改善土壤环境和缓解农田生产力的压力和风险方面具有巨大潜力^[4]。Akhtar 等^[5]发现,生物炭可以增加番茄产量和土壤贮水量;马效松等^[6]发现,在冻结与非冻结条件下,土壤导热系数均随生物炭含量增加而降低,施加生物炭能够降低土壤温度波动性;魏永霞等^[7]发现,施加生物炭可显著提高土壤孔隙度、降低土壤容重、优化土壤结构。但也有研究^[8]表明,添加过量的生物炭(60 t/hm^2)会导致土壤含水量和田间持水能力降低,并抑制作物的生长和产量。

目前,生物炭对土壤的改良作用研究大多在灌溉季节进行,一些研究者开始考虑冻融条件对生物炭改良土壤的影响。Tan 等^[9]指出,经过冻融循环后,生物炭的许多结构性孔隙被堵塞,比表面积减少了 21.67%,C 含量降低了 13.47%,冻融过程会加速生物炭的老化。而丛铭^[10]认为,老化生物炭可能比新鲜生物炭更有利于土壤改良。付强等^[11]发现,生物炭处理下的土壤冻结期冻结速率降低了 0.14 cm/d ,融化期土壤含水率增加了 1.44%。目前,冻融条件下生物炭对土壤改良的效果研究大多是在受控的室内试验条件下进行的,在自然冻融环境中对土壤影响的研究较少。考虑到新疆棉田翻耕大多在灌溉季节结束后,且冻融作用对生物炭理化特性有老化影响,有必要结合北疆地区典型的季节性冻融条件和新疆棉田特殊的非灌溉季节翻耕制度,探究非灌溉季节施加生物炭对新疆棉田土壤结构和水热特性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年 11 月至 2021 年 4 月在新疆石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室暨石河子大学节水灌溉试验站进行。试验区位于新疆生产建设兵团第八师石河子市西郊石河子大学农试场二连($86^\circ 03' 47'' \text{E}$,

$44^\circ 18' 28'' \text{N}$,海拔 450 m),属温带大陆性气候,灌溉季节升温快,昼夜温差大且干旱少雨,蒸发强烈,极端高气温可达 43°C ,年均日照时间约 $2\,950 \text{ h}$,多年平均降水量 210 mm 左右,非灌溉季节寒冷多雪。试验区 2020—2021 年非灌溉季节降水总量 57.5 mm ,极端最低气温可达 -34°C ,平均积雪厚度 20 cm ,最大积雪厚度达 40 cm ,年均无霜期 165 天,年平均风速 1.5 m/s ,2020 年 11 月表层土壤开始冻结,2021 年 2 月基本达到最大冻结深度,至 2021 年 4 月土壤完全融化。非灌溉季节气温和降水量见图 1。

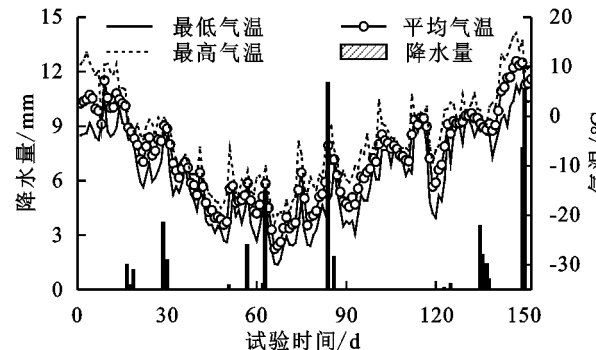


图1 非灌溉季节气温和降水量

试验前滴灌种植作物为棉花,2020 年 4 月底播种,10 月初采收,试验田地下水埋深 8 m 以下,土壤质地为壤土,黏粒、粉粒、砂粒含量分别为 12.88% , 38.82% , 48.30% ,耕层土壤容重 1.54 g/cm^3 ,颗粒密度 2.63 g/cm^3 ,土壤固、液、气相占比分别为 61.50% , 16.50% , 22.00% 。

1.2 试验设计及指标测定

试验区域内设置 15 块 $12 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 的相邻样地,按 $0, 15, 30, 45, 60 \text{ t/hm}^2$ 施加生物炭的 5 个梯度设置 B_0, B_1, B_2, B_3, B_4 处理,生物炭由机械均匀翻耕至 $0\text{—}40 \text{ cm}$ 土壤中,每个施炭量 3 块样地重复,非灌溉季节过程中保留原始积雪不做干扰。生物炭采用水稻秸秆炭(购自镇江泽地农业生物科技有限公司)。生物炭容重 0.4 g/cm^3 ,比表面积 $82.7 \text{ m}^2/\text{g}$,灰分占比 16.50% ,CEC 为 16.40 cmol/kg ,导热系数为 $0.172 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,体积热容量为 $2.3 \text{ J/(cm}^3 \cdot \text{K)}$ 。自表层土壤开始冻结进入快速冻结期(40 天),至达到最大冻结深度开始进入稳定冻结期(74 天),自最大冻结深度土壤开始融化为进入融化期(107 天),至表层土壤完全融化(139 天)为融化期结束,即冻结前期为 $0\sim 39$ 天,快速冻结期为 $40\sim 74$ 天,稳定冻结期为 $75\sim 107$ 天,融化期为 $108\sim 139$ 天。

每个试验区内埋设土壤温度动态采集系统(YM—GS,邯郸创盟电子科技有限公司),每隔 1 h 传输 1 次数据,用以测定 $20, 40, 60, 80 \text{ cm}$ 土壤温度,融后(152 天)使

用体积为 100 cm³ 环刀以 10 cm 为 1 层采取原状土样测定土壤三相比例、容重和颗粒密度。土壤含水率自试验开始每 15 天取样 1 次,采用烘干法^[12]测定,土壤容重及土壤三相比例在试验结束前取样并通过土壤三相测定仪(DIK-1150,上海泽泉科技有限公司)测定;土壤导热系数和体积热容量使用土壤热特性分析仪(TEMPOS,北京力高泰科技有限公司)测定。

1.3 数据计算

通过土壤容重 ρ_b 计算土壤总孔隙度 TP (cm³/cm³),三相比例计算广义土壤结构指数 GSSI 和土壤三相结构距离指数 STPSD。计算公式^[13]为:

$$TP=1-\frac{\rho_b}{\rho_s}$$

$$GSSI=((x_g-25)\times x_y\times x_q)0.4769$$

$$STPSD=(x_g-50)^2+(x_g-50)(x_y-50)+(x_y-50)^2$$

式中: ρ_s 为土壤颗粒密度 2.63 g/cm³; x_g 为土壤固相体积百分比(>25%); x_y 为土壤液相体积百分比(>0); x_q 为土壤气相体积百分比(>0)。

1.4 数据分析

使用 SPSS 26.0 软件进行单因素 ANOVA 差异

分析,处理间显著性差异使用 LSD 最小显著差数法进行检验;皮尔逊(N)相关性系数分析各指标之间的相关性,并对土壤水热特性和物理结构相关指标进行主成分分析。图表绘制使用 Origin 2021 软件。

2 结果与分析

2.1 生物炭施加量对土壤总孔隙度及三相比例的影响

由表 1 可知,随施炭量增加 0—40 cm 土壤平均固相比比例降低,气相比比例增加,液相比比例先增加后降低。与 B₀相比,B₂、B₃和 B₄处理土壤固相比比例分别显著降低 5.83%,6.96%,10.74%($P<0.05$);B₂和 B₃处理土壤平均液相显著增加 1.74%和 1.89%,而 B₄处理则显著降低 0.54%($P<0.05$);B₂、B₃和 B₄处理土壤平均气相比比例显著增加 4.09%,5.06%,11.28%($P<0.05$)。土壤总孔隙度随施炭量增加而增加,与 B₀相比,B₂、B₃和 B₄处理显著增加 7.12%,10.05%,12.05%。土壤 GSSI 值随施炭量增加先增加后降低,B₁、B₂、B₃和 B₄处理较 B₀显著增加 2.37%,4.93%,5.36%,4.00%($P<0.05$)。土壤 STPSD 值随施炭量增加先降低后增加,B₂和 B₃处理显著降低 24.37%和 25.47%,而 B₄处理则显著增加 19.88%($P<0.05$)。

表 1 不同生物炭处理下土壤三相比例、总孔隙度、GSSI 及 STPSD

处理	土壤三相比例/%			总孔隙度/ (cm ³ ·cm ⁻³)	广义土壤 结构指数	土壤三相结构 距离指数
	固相	液相	气相			
B ₀	57.50±2.27a	24.57±0.21b	17.93±2.26c	0.43±0.01c	94.48±1.21c	6.44±0.17b
B ₁	54.92±2.03ab	25.54±0.36ab	19.55±2.16bc	0.44±0.01bc	96.72±0.81b	5.80±0.13bc
B ₂	51.67±2.06bc	26.31±0.29a	22.01±2.00b	0.46±0.01b	99.14±0.73a	4.88±0.13c
B ₃	50.55±1.83bc	26.46±0.49a	22.99±1.33b	0.47±0.01ab	99.54±0.38a	4.80±0.21c
B ₄	46.76±1.58c	24.03±0.23c	29.21±1.64a	0.48±0.01a	98.26±0.68a	7.72±0.55a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 生物炭施加量对土壤含水率的影响

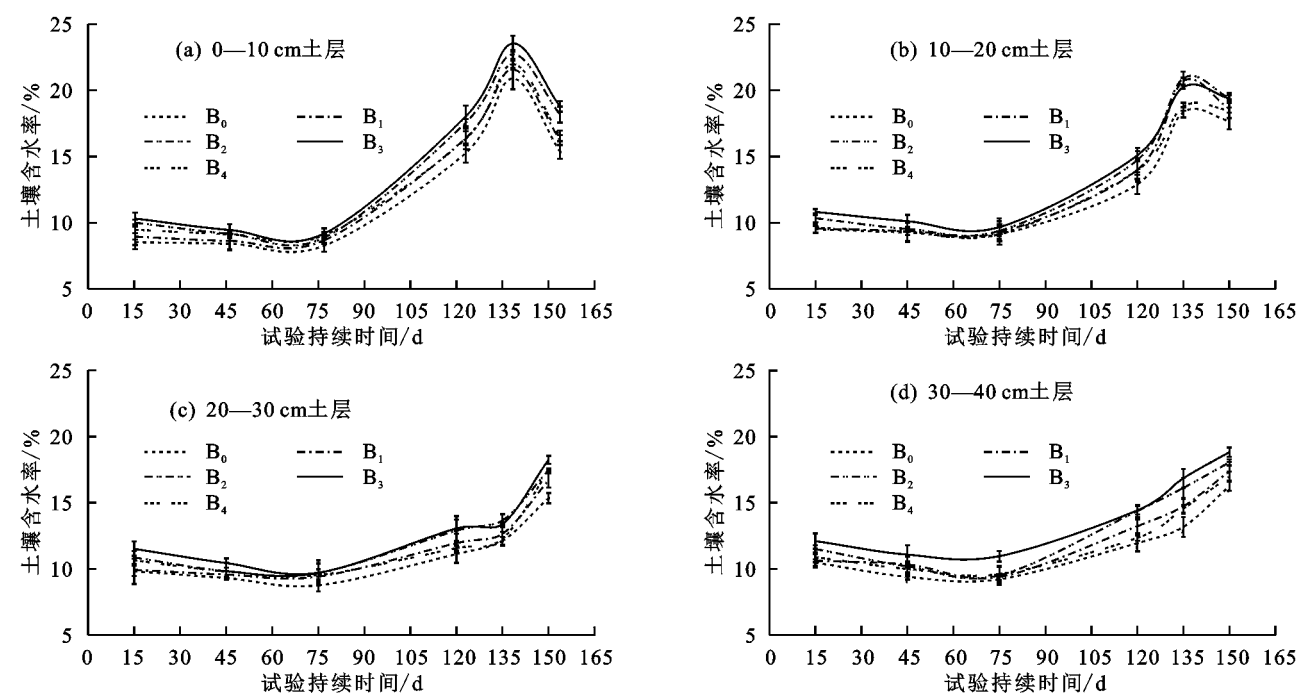
由图 2 可知,0—10,10—20,20—30,30—40 cm 土壤含水率在冻结前和快速冻结期总体呈现下降趋势,0—20 cm 土壤含水率在融化期先上升后下降,20—40 cm 土壤含水率则呈上升趋势。与 B₀处理相比,仅 B₃处理快速冻结期在 0—40 cm 土壤含水率均有显著性变化($P<0.05$),分别显著提高 1.04%,0.86%,1.68%和 1.14%。在稳定冻结期,除 B₃处理在 20—30 cm 处土壤含水率与 B₀处理相比显著提高 1.68%外($P<0.05$),其余各处理 0—40 cm 土壤含水率无显著性差异。融后,B₂、B₃处理 0—40 cm 土壤含水率与 B₀处理相比均有显著性变化($P<0.05$),0—10 cm 分别显著增加 2.81%和 3.44%,10—20 cm 分别显著增加 1.73%,1.69%;20—30 cm 分别显著增加 1.8%,2.57%;30—40 cm 分别显著增加 2.11%,2.9%;相较于 B₀处理,B₁、B₂、B₃、B₄处理融后 0—40 cm 土壤平均含水率增加 1.07%,2.11%,2.65%,1.20%。

2.3 生物炭施加量对土壤导热系数、体积热容量和温度的影响

由图 3 可知,施炭处理的温度变化与 B₀的趋势相似,浅层土壤温度最低,并随土壤深度的增加而增加。在快速冻结期间,5 个处理的 0—20 cm 土层于同一时间(40 天)开始冻结;B₀、B₄处理的 20—40 cm 土层先开始冻结(50 天),B₁、B₂、B₃处理于 55 天开始冻结。在稳定冻结期,与 B₀相比,B₁、B₂、B₃处理在 0—20 cm 土层的最低温度与 B₀相比分别增加了 0.34,2.15,1.78℃,而 B₄处理则降低了 1.78℃(图 4);20—40 cm 土层增加了 0.08,1.99,1.4℃,而 B₄处理降低了 1.05℃(图 4)。B₀处理最大冻结深度超过 80 cm,B₁、B₃、B₄处理小于 80 cm,B₂处理小于 60 cm(图 3)。在融化期,0—20 cm 土层融化顺序为 B₂(107 天)、B₃(130 天)、B₁(134 天)、B₄(134 天)、B₀(138 天);B₀、B₁、B₂、B₃、B₄处理的冻结时长分别为 98,94,67,90,94 天;20—40 cm 土层融化顺序为 B₂(110

天)、B₃(113 天)、B₁(122 天)、B₄(124 天)、B₀(133 天);B₀、B₁、B₂、B₃、B₄ 处理的冻结时长分别为 83,67,55,58,74 天。非灌溉季节 B₁、B₂、B₃ 处理在 0—20 cm 土层最大温

差值与 B₀ 相比减少 0.03,2.02,1.71 ℃,而 B₄ 处理则增大 2.97 ℃;20—40 cm 土层减少 0.47,2.13,1.75 ℃,而 B₄ 处理则增大 0.11 ℃(图 4)。



注:误差线表示标准误差($n=3$)。

图 2 不同生物炭处理下含水率的时空分布

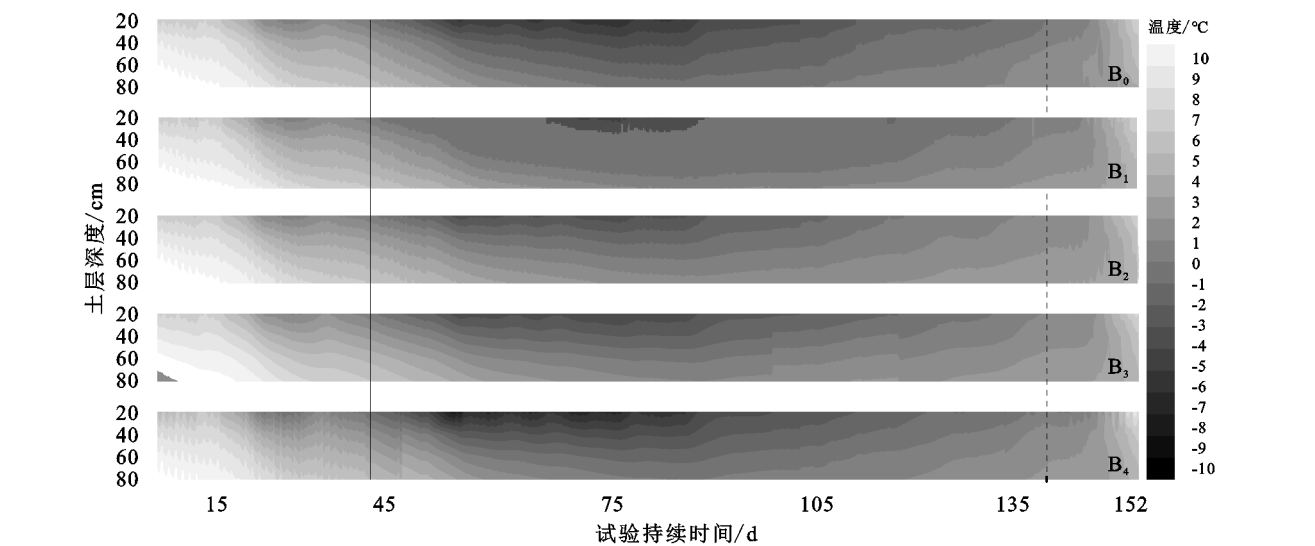


图 3 不同生物炭处理下温度的垂直分布

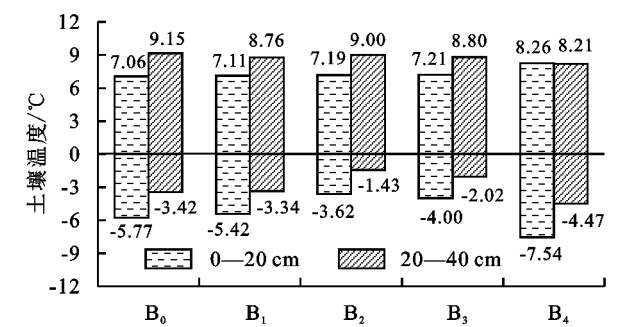


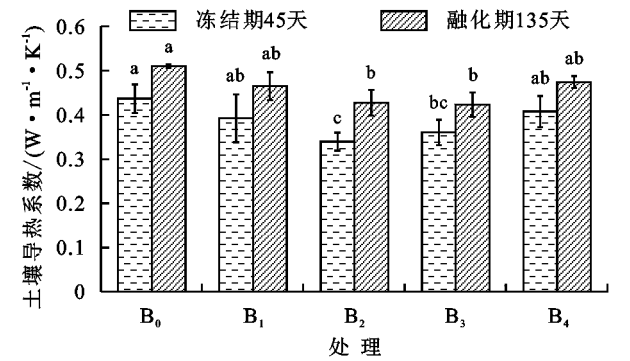
图 4 不同生物炭处理下土壤温度极值量

在冻结期(施炭后 45 天),土壤导热系数随施炭量的增加先减少后增加;B₂、B₃ 处理与 B₀ 处理相比有

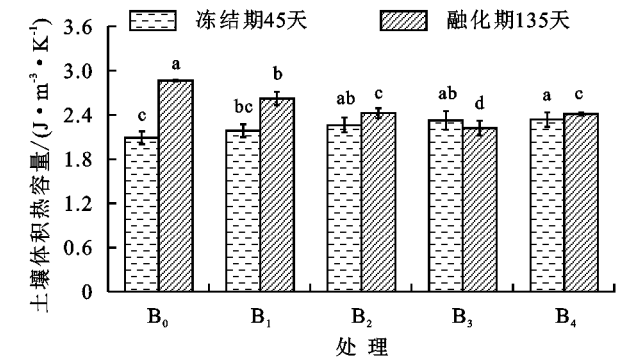
显著性降低($P<0.05$),分别显著降低了 22.73%,18.18%(图 5)。土壤体积热容量随施炭量增加而增加,B₂、B₃、B₄ 处理与 B₀ 处理相比土壤体积热容量均显著性增加($P<0.05$),分别显著增加了 7.18%,11.00%,12.44%。在融化期(施炭后 135 天),土壤导热系数随施炭量增加先减小后增加,与 B₀ 处理相比,B₂、B₃ 处理下土壤导热系数均显著降低 15.69%($P<0.05$)。土壤体积热容量随施炭量增加先减小后增加,与 B₀ 处理相比,B₁、B₂、B₃、B₄ 处理土壤体积热容量均有显著性降低($P<0.05$),分别显著降低 5.23%,12.20%,19.16%,12.54%。

2.4 不同处理间综合评价

为评价非灌溉季节不同生物炭施加量对土壤影响效果的优劣,选取土壤三相结构和水热特性相关指标进行综合评价。融后土壤含水率(X1)越高,表明土壤保墒效果越好;非灌溉季节最低温度(X2)越高,最大温差(X3)越小,冻结时长(X4)越小,表明土壤保温效果越好;GSSI(X5)越大,STPSD(X6)越小,表明土壤三相结构越好,总孔隙度(X7)越大,表明土壤透气性越好。由表 2 可知,对土壤在 0—40 cm 土壤的相关指标取均值进行相关性分析,存在 10 对显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关关系。其中,



土壤含水率与非灌溉季节最低温度和总孔隙度呈显著的正相关,与 GSSI 呈极显著正相关,与最大温差呈显著的负相关。非灌溉季节最低温度与最大温差、STPSD 呈极显著的负相关,与总孔隙度呈显著的负相关,最大温差与 STPSD、呈极显著的正相关,与总孔隙度呈显著的正相关,STPSD 与总孔隙度呈极显著的正相关。土壤含水率、温度和土壤结构各相关指标间存在诸多联系,直接进行评价会造成信息重复,最终影响评价结果,因此,利用主成分分析法将具有相关性的指标组合成新的互相无关的综合指标进行综合评价,以求提高综合评价的可靠性。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 5 不同生物炭处理下土壤体积热容量和导热系数对比

表 2 土壤含水率、温度及土壤三相结构相关指标间的相关性

指标	非灌溉季节 最低温度	最大温差	冻结时长	GSSI	STPSD	总孔隙度
土壤含水率	0.654 *	-0.653 *	-0.519	0.948 **	-0.615	0.712 *
非灌溉季节最低温度		-0.996 **	-0.594	0.483	-0.945 **	-0.694 *
最大温差			0.555	-0.471	0.964 *	0.650 *
冻结时长				-0.493	0.461	-0.366
GSSI					-0.411	0.844 **
STPSD						0.094

注: * 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$ 。

通过主成分分析,以特征值 >1 的原则选取 2 个主成分,累计方差贡献率为 96.70%(表 3),可代表各处理对土壤保温保墒效果的综合影响。第 1 主成分的方差贡献率为 68.68%,主要受土壤含水率、非灌溉季节最低温度和 GSSI 的正向影响,其贡献率大小为土壤含水率 $>$ 非灌溉季节最低温度 $>$ GSSI,综合相关关系可知,土壤含水率与非灌溉季节最低温度呈显著的正相关($P<0.05$),土壤含水率与 GSSI 呈极显著的正相关($P<0.01$),非灌溉季节最低温度与 GSSI 的相关性也为正相关,即当 1 个指标增大时,其他指标也随之增大,第 1 主成分得分也会随之增大。第 2 主成分方差贡献率为 28.02%,主要受总孔隙度的正向影响和非灌溉季节最低温度的负向影响,总孔隙度的贡献率大于非灌溉季节最低温度,综合相关关

系可知,总孔隙度与非灌溉季节最低温度呈显著的负相关($P<0.05$),即随着总孔隙度的增大,非灌溉季节最低温度下降,第 2 主成分的得分增大(表 4)。

综合 2 个主成分的方差贡献率可以得到基于以上 7 个指标的各处理综合评价线性函数:

$$Z=0.6868Z_1+0.2802Z_2$$

式中:Z 为基于土壤含水率、最低温度和土壤物理结构相关指标的各处理综合得分(表 5);Z₁为主成分 1 的综合得分;Z₂为主成分 2 的综合得分。

将各指标原始数据标准化后带入公式可得到各处理的综合得分和综合得分排名(表 4)。综合排名依次为 B₃、B₂、B₄、B₁、B₀处理,仅 B₃、B₂处理得分为正值,施炭量最大的处理 B₄处理综合得分低于 B₃、B₂处理,综合得分最低的为 B₀处理。

表 3 主成分特征值及方差贡献率

主成分	特征值	方差 贡献率/%	累计方差 贡献率/%
X1	4.807	68.675	68.675
X2	1.962	28.024	96.698
X3	0.206	2.939	99.638
X4	0.025	0.362	100.000
X5	5.715E-16	8.164E-15	100.000
X6	1.733E-16	2.476E-15	100.000
X7	-7.349E-17	-1.050E-15	100.000

表 4 主成分荷载矩阵

指标	主成分 1	主成分 2
X1	0.916	0.366
X2	0.890	-0.445
X3	-0.888	0.451
X4	-0.921	-0.045
X5	0.802	0.597
X6	-0.866	0.474
X7	0.384	0.918

表 5 基于土壤含水率、最低温度和土壤物理结构相关指标的各处理综合得分和排名

处理	主成分 1	主成分 2	综合 得分	综合得分 排名
B ₀	-2.31	-1.55	-2.02	5
B ₁	-0.60	-0.64	-0.59	4
B ₂	2.44	-0.37	1.57	2
B ₃	2.18	0.35	1.59	1
B ₄	-1.70	2.21	-0.55	3

3 讨论

3.1 生物炭施加量对土壤总孔隙度及土壤三相相关指标的影响

施炭处理的 0—40 cm 土壤固相比比例降低 2.58%~10.74%，总孔隙度增加 3.38%~12.05%，GSSI 值提高 2.37%~5.36%，这与 Fu 等^[14]的研究结果相似。生物炭是一种具有多孔结构的材料，其结构的特殊性使其容重(0.4 g/cm³)远小于土壤容重，施入土壤后导致炭—土混合体的容重降低，总孔隙度增大，固相体积降低。广义土壤结构指数(GSSI)是基于土壤三相比为研究对象，来客观表达土壤结构功能的差异变化，土壤三相结构距离指数(STPSD)能更直观地反映土壤三相比结构的变化趋势，已有研究^[15]表明，理想的土壤三相结构比例为 2：1：1，此时的 GSSI 为 100，因此，土壤的 GSSI 越接近 100，表明土壤结构越理想，而 STPSD 越低，表明土壤结构越接近理想状态。对比 B₀处理非灌溉季节前后的变化发现，单独的冻融作用可以降低土壤固相比比例，但施炭处理的效

果明显更好，施炭处理均显著增加 GSSI，B₂、B₃处理显著降低 STPSD($P<0.05$)。B₄处理的 GSSI 相较于 B₃处理出现降低现象，STPSD 出现增大现象，这归因于过量生物炭使土壤固相体积降低至 50%以下且偏移量随施炭量增加而增加，使土壤三相结构偏离理想的 2：1：1。魏永霞等^[16]研究发现，施加生物炭会使土壤孔隙度升高，但过高的孔隙度直接增加土壤与大气间水热交换的通道，导致土壤中水分蒸发加快，受冻融侵袭的影响也更剧烈。因此，从土壤结构方面来看，生物炭的施加并不是越多越好，适量的生物炭更有助于土壤结构的改善。

3.2 生物炭施加量对土壤导热系数、体积热容量和温度的影响

非灌溉季节生物炭施加使土壤耕层最低温度增加 0.34~2.15 ℃，最大温差缩小 0.47~2.14 ℃，冻结时长缩短 4~30 天，这与 Gao 等^[17]的研究结果相似。施炭处理的保温效果归因于生物炭与土壤相比有更低的导热系数和更高的体积热容量，生物炭的导热系数仅为 0.172 W/(m·K)，当生物炭添加到土壤中时，混合土壤的导热系数降低。冻结期 B₂、B₃处理分别显著降低了 22.73%，18.18%($P<0.05$)，该研究结果与 Zhao 等^[18]的结论一致。土壤在快速冻结期向外界散发热量的能力随着土壤导热系数的降低而降低，使得施加生物炭处理的土壤在冻结期的温度有所提高。在融化期，融雪导致土壤含水率快速增加，土壤体积热容量随之增加，而生物炭的体积热容量为 2.3 J/(cm³·K)相比于水的 4.28 J/(cm³·K)更小，融化期的炭—土混合体体积热容量降低，土壤温度升高需要吸收的热量更少，且炭—土混合体在冻结期的温度更高。付强等^[19]在松嫩平原土壤导热系数和体积热容量的变化上得出相似的结果。值得注意的是，土壤温度并没有随生物炭施加量的增加而不断增加，B₄处理在保温方面呈现负效应。总孔隙度随施炭量的增加而增加，这增加了土壤与外界的气体交换通道，进而增加了热量的损失，导致冻结期表层土壤保温性能减弱，冻融作用产生的侵蚀更严重，相关分析也显示最低温度与总孔隙度呈显著的负相关($P<0.01$)，相关系数为-0.694。

3.3 生物炭施加量对土壤含水率的影响

与对照处理相比，施炭处理融后 0—40 cm 土壤平均含水率增加 1.07%~2.65%，其中，B₂、B₃处理土壤含水率均有显著性变化($P<0.05$)，这与高利华等^[20]的研究结果相似。生物炭作为一种直接输入土壤的材料，通过其对土壤总孔隙度的增加进而提高土

壤的蓄水能力^[21]。生物炭施加初期对土壤含水率影响程度较低,是因为施炭初期土壤含水率较低,生物炭的保水性很难体现,试验后期,随着积雪的融化等因素,土壤含水率快速上升,生物炭的保水性能逐渐发挥,融化期施炭土壤含水率的提高展现出显著性,这与苏旭等^[22]的研究有一定相似性。此外,鞠文亮等^[23]研究表明,冻融循环会破坏生物炭的完整形状,从而增加生物炭的比表面积和孔容,这更有利于土壤蓄水。相关分析表明,在经历季节性冻融后,总孔隙度与土壤含水率呈显著的正相关,相关系数为 0.712 ($P < 0.05$)。融后的土壤含水率没有随生物炭施增加量增加而增加, B_4 处理的土壤含水率低于其他处理,是由于孔隙度的增加导致含水率增加,可能超过土壤田间持水量,多余的水在重力作用下向下运移,使上部土壤的含水率减小,下部土壤含水率增加,且过大的孔隙度也会加剧积雪融化后蒸发作用对裸露土壤的影响,尚杰等^[24]研究也提出,过大的孔隙率并不利于土壤水分的保存。

3.4 基于主成分分析对不同处理进行综合评价

主成分分析表明, B_3 处理综合得分最高,其次为 B_2 处理。从主成分分析过程来看,第 1 主成分贡献率达 68.68%,对综合得分影响最大,第 1 和第 2 主成分累计方差贡献率为 96.70%,可代表各处理对土壤水热特性和物理结构改良的综合影响。第 1 主成分得分最高的处理为 B_2 ,主要受土壤含水率、非灌溉季节最低温度和 GSSI 的正向影响(表 4),且这 3 个指标间均呈正相关关系。因此, B_2 处理能够有效提高土壤保温保墒能力并改良土壤三相结构。而第 2 主成分主要受总孔隙度的正向影响和非灌溉季节最低温度的负向影响,且总孔隙度与非灌溉季节最低温度呈显著的负相关($P < 0.05$),第 2 主成分得分最高为 B_4 处理。融后土壤含水率和非灌溉季节最低温度越高,最大温差和冻结时长越小,表明保温保墒效果更好, GSSI 越大, STPSD 越小则代表土壤结构越理想。对土壤含水率而言,融后 B_3 处理最大。对非灌溉季节土壤温度而言, B_2 处理最低温度最大,温差最小,冻结时长最短,而 B_4 处理在保温方面则展现出温差更大,最低温度更低,冻结时间增长的负作用。对 GSSI 而言,在 0—40 cm 土壤的均值 B_3 处理最高, STPSD 为 B_3 处理最低, B_4 处理的总孔隙度最大,但与 B_3 处理相比并无显著性差异。综合主成分 1 和 2, B_3 处理得分排名第 1,因此,与其他处理相比, B_3 处理对土壤保温保墒能力的提高和对土壤结构的改良效果最优,其次为 B_2 处理,非灌溉季节滴灌棉田生物炭的最佳施用量为 30~45 t/hm²。

4 结论

(1)非灌溉季节生物炭施加改善了土壤的三相结构,增加了土壤孔隙度。0—40 cm 土壤固相比例平均降低 2.58%~10.74%,总孔隙度平均增加 3.38%~12.05%, GSSI 值平均增加 2.37%~5.36%。

(2)非灌溉季节生物炭施加有利于增强土壤保墒能力。融后含水率平均提高 1.07%~2.65%,含水率增加最多的处理施炭量为 45 t/hm²。

(3)非灌溉季节生物炭施加有利于增强土壤保温能力。土壤最低温度增加 0.34~2.15 °C,温差降低 0.47~2.14 °C。保温效果最好的是 30 t/hm² 处理,而 60 t/hm² 处理在保温方面显示出负作用。

(4)通过主成分分析各处理综合得分可知,施炭量 45 t/hm² 在保温保墒和改良土壤结构方面效果最优,其次为 30 t/hm²。非灌溉季节生物炭最佳施用量为 30~45 t/hm²。

参考文献:

- [1] 陈超.融冻深度影响下黑土坡耕地土壤侵蚀机理与模型研究[D].北京:中国农业大学,2019.
- [2] Karimzadeh S H, Bahador M, Tadayon M, et al. Modelling seed germination and seedling emergence of flax and sesame as affected by temperature, soil bulk density, and sowing depth [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 141: e111770.
- [3] 时学双,李法虎,普布多吉.量秸秆覆盖对高海拔寒区土壤温度和春青稞生长的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):151-160.
- [4] Uusitalo V, Leino M Neutralizing global warming impacts of crop production using biochar from side flows and buffer zones: A case study of oat production in the boreal climate zone [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 227: 48-57.
- [5] Akhtar S S, Li G, Andersen M N, et al. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2014, 138: 37-44.
- [6] 马效松,付强,徐淑琴,等.生物炭对北方寒区农田土壤热性能参数的影响[J].农业机械学报,2019,50(10): 298-305.
- [7] 魏永霞,肖敬萍,王鹤,等.施加生物炭对黑土区坡耕地改土培肥效应的持续影响[J].农业机械学报,2021,52(3):305-314.
- [8] Li C J, Xiong Y W, Qu Z Y, et al. Impact of biochar addition on soil properties and water-fertilizer productivity of tomato in semi-arid region of Inner Mongolia, China [J]. Geoderma, 2018, 331: 100-108.
- [9] Tan L S, Ma Z H, Yang K Q, et al. Effect of three ar-

tificial aging techniques on physicochemical properties and Pb adsorption capacities of different biochars [J]. Science of The Total Environment,2020,699:e134223.

[10] 丛铭.生物炭及其老化对小白菜生长和土壤肥力的影响[D].武汉:华中农业大学,2021.

[11] 付强,侯仁杰,马梓昇,等.季节性冻土区不同调控模式对土壤水盐迁移协同效应的影响[J].黑龙江大学学报,2019,10(1):1-10,33.

[12] 李宗昱,王全九,张继红,等.磁化—去电子水对盐渍化土壤水盐运移特征影响[J].水土保持学报,2021,35,174(3):290-295.

[13] 赵航.不同生物炭调控模式对冻融土壤物理特性的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2020.

[14] Fu Q, Zhao H, Li H, et al. Effects of biochar application during different periods on soil structures and water retention in seasonally frozen soil areas [J].Science of the Total Environment,2019,694:e133732.

[15] 李传哲,章欢,姚文静,等.生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(10):3424-3432.

[16] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区坡耕地施加生物炭对土壤结构与大豆产量的影响[J].农业机械学报,2019,50(8):309-320.

[17] Gao Y, Li T X, Fu Q, et al. Biochar application for the improvement of water-soil environments and carbon emissions under freeze-thaw conditions: An in-situ field trial [J].Science of the Total Environment,2020,723:e138007.

[18] Zhao J K, Ren T S, Zhang Q Z, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China plain [J].Soil Science Society of America Journal,2016,80(5):1157-1166.

[19] 付强,侯仁杰,马梓昇,等.季节性冻土区不同调控模式对土壤水盐迁移协同效应的影响[J].黑龙江大学学报,2019,10(1):1-10,33.

[20] 高利华,屈忠义.膜下滴灌条件下生物质炭对土壤水热肥效应的影响[J].土壤,2017,49(3):614-620.

[21] 柴冠群,赵亚南,黄兴成,等.不同炭基改良剂提升紫色土蓄水保墒能力[J].水土保持学报,2017,31(1):296-302.

[22] 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.

[23] 鞠文亮,荆延德.陈化处理对棉花秸秆生物炭理化性质的影响[J].环境科学学报,2017,37(10):3853-3861.

[24] 尚杰,耿增超,赵军,等.生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.

(上接第 219 页)

[15] Cao X C, Zeng W, Wu M Y, et al. Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint [J].Journal of Cleaner Production,2021,309:e127371.

[16] 雷波,刘钰,许迪,等.农业水资源利用效用评价研究进展[J].水科学进展,2009,20(5):732-738.

[17] Cao X C, Zeng W, Wu M Y, et al. Hybrid analytical framework for regional agricultural water resource utilization and efficiency evaluation [J].Agricultural Water Management,2020,231:e106027.

[18] Lu Y, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: A case study in the North China Plain [J].Journal of Cleaner Production,2016,116:71-79.

[19] 郭相平,黄双双,王振昌,等.不同灌溉模式对水稻抗倒伏能力影响的试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(5):1-5.

[20] Wu M Y, Cao X C, Guo X P, et al. Assessment of grey water footprint in paddy rice cultivation: Effects of field water management policies [J]. Journal of Cleaner Production,2021,313:e127876.

[21] 俞双恩,李偲,高世凯,等.水稻控制灌溉模式的节水高产减排控污效果[J].农业工程学报,2018,34(7):128-136.

[22] 朱成立,郭相平,刘敏昊,等.水稻沟田协同控制灌排模式的节水减污效应[J].农业工程学报 2016,32(3):86-91.

[23] 操信春,崔思梦,吴梦洋,等.水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价[J].水利学报,2020,51(10):1189-1198.

[24] Ali M K, Klein K K. Water use efficiency and productivity of the irrigation districts in southern Alberta [J]. Water Resources Management,2014,28(10):2751-2766.

[25] 操信春,邵光成,王小军,等.中国农业广义水利用系数及时空格局分析[J].水科学进展,2017,28(1):14-21.