

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.025

魏志森, 张少良, 闫思华, 等. 生物炭施用对冻结期退化黑土水热盐动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 322-334.

WEI Zhimiao, ZHANG Shaoliang, YAN Sihua, et al. Effects of biochar application on the dynamic of soil moisture-temperature-salt in degraded Mollisols during freezing period[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 322-334.

生物炭施用对冻结期退化黑土水热盐动态变化的影响

魏志森, 张少良, 闫思华, 闫鹏科, 冯兰茜, 肖梓良, 刘志华

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要: [目的] 生物炭施用可改变土壤理化性状, 研究不同生物炭施用方式对土壤水、热及电导率(EC)分布的影响, 可为季节性冻土科学管理提供依据。[方法] 利用田间定位试验, 通过长期观测, 研究东北黑土区不同生物炭施用方式对冻结期的土壤液态水含量、温度及EC的影响差异。生物炭施用方式包括一次性生物炭混施 40 t/hm² (HO)、生物炭底施 40 t/hm² (HE), 空白为 0 t/hm² (CK)。[结果] 2种生物炭施用方式均增加冻结期土壤平均液态水含量 ($p < 0.05$), 表现为 HO > HE > CK; 整个试验周期内生物炭施用均显著增加土壤EC, 且HO和HE处理土壤平均EC分别比CK增加17.73%, 6.89%; 2种生物炭施用方式对土壤温度影响不同, 与CK相比, HE处理土壤平均温度提高0.32℃, 而HO处理土壤平均温度降低0.46℃。此外, HE处理相较于HO和CK处理减弱冻结期土壤液态水、温度及EC的变化幅度。[结论] 生物炭混施和底施均有利于提高冻结期退化黑土液态水含量和EC, 特别是生物炭底施还有利于提升冻结期耕层土壤温度, 而生物炭混施在同时期还有利于减缓土壤冻结作用, 2种生物炭施用方式均可能对冻结期土壤水盐运移和物质转化过程有重要影响, 甚至对春季作物出苗和早期生长产生重要影响。

关键词: 生物炭; 冻结期; 退化黑土; 土壤液态水含量; 土壤温度; EC

中图分类号: S278

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0322-13

Effects of Biochar Application on the Dynamic of Soil Moisture-Temperature-Salt in Degraded Mollisols During Freezing Period

WEI Zhimiao, ZHANG Shaoliang, YAN Sihua, YAN Pengke, FENG Lanqian, XIAO Ziliang, LIU Zhihua

(School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: [Objective] Biochar application can change soil physicochemical properties. The study of the effects of different biochar application methods on soil moisture, temperature and electrical conductivity (EC) distribution, which can provide basis for the scientific management of seasonally frozen soil. [Methods] The effects of different biochar application methods on soil liquid water content, temperature and EC during freezing period were studied by field experiment and long-term observation in black soil region of northeast. Biochar application methods included one-time biochar mixed application of 40 t/hm² (HO), biochar bottom application of 40 t/hm² (HE), and the blank was 0 t/hm² (CK). [Results] Both biochar application methods increased the mean soil liquid water content during the freezing period ($p < 0.05$), as HO > HE > CK. The application of biochar application significantly increased soil EC throughout the experimental cycle, and the average soil EC increased by 17.73% and 6.89% in the HO and HE treatments, respectively, compared to CK. The two biochar application methods had different effects on the soil temperature. Compared with CK, the mean soil temperature increased by 0.32℃ in the HE treatment, while the mean soil temperature decreased by 0.46℃ in the HO treatment. In addition, the HE treatment weakened the range of change in soil liquid water, temperature and EC during the freezing period compared to HO and CK treatments.

收稿日期: 2024-03-05

修回日期: 2024-03-31

录用日期: 2024-04-09

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-24

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500801); 东北农业大学“青年领军人才”支持计划项目 (NEAU2023QNLJ-016)

第一作者: 魏志森 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事黑土保育与农业废弃物资源化利用研究。E-mail: weizhimiao2000@163.com

通信作者: 张少良 (1980—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事农田黑土物质转化、运移、调控和生态环境效应研究。E-mail: shaoliang.zhang@neau.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

[**Conclusion**] Both heterogeneous and homogeneous biochar application were beneficial to increase the liquid water content and *EC* of degraded black soil during freezing period. Especially heterogeneous biochar application was also beneficial to increase the soil temperature of the tillage layer during freezing period, homogeneous biochar application can also reduce the soil freezing during freezing effect during the same period. Both of the two biochar application modes may have an important impact on the soil moisture-salt transport and material transformation process during the freezing period, and even have an important effect on the spring emergence and early growth of crops.

Keywords: biochar; freezing period; degraded black soil; soil liquid water content; soil temperature; *EC*

Received: 2024-03-05

Revised: 2024-03-31

Accepted: 2024-04-09

Online(www.cnki.net): 2024-05-24

世界黑土区总面积约为 900 万 km^2 , 其中位于我国东北部黑土面积超过 103 万 km^2 , 是重要的商品粮生产基地^[1]。东北黑土位于季节性冻土区, 每年土壤冻结期长达 3 个月以上^[2-3]。冻结过程土壤发生冻胀导致土壤变形增加融化过程土壤沉降, 进而改变土壤孔隙度及团聚体组成, 影响非冻结期土壤水分、养分和土壤颗粒的运移。同时, 冻结过程土壤理化性质的改变也将影响到土壤微生物的组成、数量和活性, 进而影响解冻后土壤物质转化和循环过程^[4], 致使土地肥力下降^[5]。冻结常迫使水分向上迁移, 而冻胀易增加土壤孔隙^[4], 该过程提升土壤热量传输和比热容, 进而导致冻结期间土壤温度降低^[6]; 此外, 土壤盐分也随水分向上迁移, 进而影响土壤盐分的垂直分布。已研究^[7-8]发现, 冻结期虽然土壤温度很低, 但土壤中仍然含有一定的液态水, 特别是当土壤中盐分含量较高的时候, 冻结期土壤水分运移和分布将影响整个土体的体积变化。同时, 冻结期土壤水、热、盐变化也将影响到融解期土壤水、热、盐的变化, 进而影响翌年作物出苗和早期生长^[2,9], 因此研究冻结期土壤水、热、盐的变化规律对农业生产和环境保护等均具有重要意义。

生物炭作为土壤改良剂除可改变土壤结构、增加土壤孔隙、降低土壤容重、影响土壤团聚体的大小和分布外, 还直接或间接改善土壤温度、水分、电导率(*EC*, 常用来反映土壤中可溶性盐浓度或盐含量)及微生物组成和活性, 进而影响土壤养分的转化、淋溶及有效性^[4,6-7]。已有研究^[10]发现, 褐土中施加 3 年小麦秸秆生物炭后, 增加土壤含水量, 且通过改善土壤物理性质, 进而提高土壤真菌群落。此外, 在土壤中施加玉米秸秆生物炭后, 除增加冻结期土壤持水能力, 还对表层土壤具有保温和缓冲作用, 降低昼夜温差, 减少养分的流失, 改善土壤水热肥状况, 进而提高作物产量^[11-12]。也有研究^[4]表明, 在冻结期土壤水分

携带其中的可溶性盐向上迁移; 且融化时受外界温度影响水分向上蒸发, 盐分向表层聚集; 同时生物炭具有较强的吸附能力, 其对土壤中盐离子的吸附, 可提高春季土壤表层盐分^[13]。然而, 由于生物炭的施用量及其所处农田气候和土壤等环境条件的不同, 其对土壤水热盐的影响也存在较大差异^[14-16]。如在土壤非灌溉季施用生物炭 60 t/hm^2 时增加土壤总孔隙度和含水量, 进而增加土壤散热和比热, 致使土壤平均温度降低^[17]。虽然生物炭中同时含有亲水和疏水基团, 但施用量较高时(如砂质壤土中, 生物炭施用量 $>80 \text{ t}/\text{hm}^2$) 疏水作用较强, 导致土壤水分降低^[18-21]。生物炭施用浓度 $<8\%$ 时有效降低灰漠土壤中总盐含量, 对作物发芽具有积极作用; 而生物炭施用浓度 $>8\%$ 时显著提高总盐含量, 威胁种子萌发及作物生长^[22]。已有研究^[23]还发现, 冻融改变生物炭颗粒的大小和形态, 增加其比表面积和孔隙体积, 进而影响土壤水分及盐分的传输和积累。同时, 因为生物炭呈黑色易吸热, 并对土壤有一定的保温作用, 这对于改善季节性冻土区土壤的物理性质具有重要意义^[9]; 但随着作物覆盖率增加, 生物炭增温的作用逐渐减弱, 甚至消失^[24]。目前关于生物炭施用对土壤水热盐的研究多关注于作物生长季, 而关于生物炭施用对季节性冻土区冻结期土壤水热和 *EC* 的影响尚缺乏研究。

当前生物炭施用方式多采用生物炭与土壤混合的施用方式(混施)^[4,7], 据报道^[25]生物炭对溶液中离子有很强的吸附和过滤作用, 因此土壤中富集生物炭层可能减少土壤中养分的淋失; 也有报道^[26]认为, 生物炭混施对土壤生物有一定的毒性, 因此耕层底部集中施用生物炭(底施)可能减少生物炭对土壤生物的毒副作用。然而当关于生物炭底施对土壤理化性质、养分利用效率和作物产量的影响研究相对较少, 关于混施和底施生物炭对冻结期土壤水热盐的影响更缺乏报道。为此本研究选择位于典型黑土区的哈尔滨

市典型黑土为研究对象,通过 8 年定位试验,揭示生物炭混施和底施对冻结期典型黑土液态水含量、温度及 EC 动态的影响,研究结果预期为深入理解冻结对土壤物质转化运移机制和科学管理黑土等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于黑龙江省哈尔滨市东北农业大学向阳试验基地(45°46′10″,126°56′02″)。该地区位于松嫩平原中部,属温带大陆性季风气候,冬长,夏短,试验基地年平均气温 3.6 ℃,冬季平均气温-14.2 ℃,年平均日照时间 2 600 h,年平均降水量 500~600 mm,年平均降雪量 23.6 mm,土壤从 11 月上旬开始冻结,到翌年 4 月下旬逐渐开始融化,最大冻结深度约为 180 cm。冬季冻结期,试验区多呈自然积雪覆盖,无植被覆盖。

1.2 试验设计

2017 年秋季设置不同生物炭施用方法的处理,包括一次性生物炭混施(HO)10,20,40 t/hm²,生物炭底施(HE)10,20,40 t/hm²,空白(CK)为 0 t/hm²。具体为 HO,生物炭与耕层 0—20 cm 土层土壤充分混均(土层 0—20 cm 为土壤耕作层,受土壤扰动较大);HE,剥离 0—20 cm 土层土壤(犁底层在 20—40 cm 土层),然后生物炭直接铺在犁底层表面,再将表土归还;CK,传统耕作不施用生物炭。各处理每年秋季旋松起垄(旋松深度约为 20 cm,起垄高度约为 15 cm;对 HE 处理土壤旋松起垄时未将底施于犁底层深处的生物炭混入上层土壤中),翌年种植玉米。试验小区采用完全随机区组分布,每个小区面积为 4 m²(2 m×2 m),每个处理 4 个重复,其中 3 个重复利用土壤温度和水分传感器(HydraProbe II soil sensor, Stevens Water Monitoring Systems)监测。各处理均为玉米连作,种植期间采用垄作,垄距为 0.67 m,株距为 0.28 m(种植密度为 5.2 万株/hm²)。播种时喷洒阿特拉津除草剂,夏季人工除草。试验地土壤类型为典型黑土,其基础理化性质见表 1,试验地土壤有机质含量为 3.03%(相比 1980 年全国普查减少 29.86%^[25]),在 10%~30% 属于中度退化黑土^[27]。因为施用 40 t/hm² 生物炭对于提高中度退化黑土质量和作物产量效果最好,所以本研究以 HO 和 HE 施用量 40 t/hm² 为研究对象^[25],且在冻结期前测量土壤容重,分别为 CK:1.2 g/cm³,HO:1.04 g/cm³,HE:1.18 g/cm³。

试验所用生物炭由辽宁金禾福农业发展有限公司提供,由玉米秸秆在 450 ℃ 条件下加热且厌氧条件下制成,在热解的过程中停留 1 h。生物炭基本性质见表 1。

表 1 土壤和生物炭基础理化性质

Table 1 Soil and biochar base physical and chemical properties

土壤		生物炭	
土壤类型	典型黑土	原料	玉米秸秆
土壤容重/(g·cm ⁻³)	0.935	pH	9.25
饱和含水量/%	60.2	全氮/(g·kg ⁻¹)	15.1
田间持水量/%	30.8	全磷/(g·kg ⁻¹)	7.93
土壤有机质含量/%	3.03	微孔隙容积/(mL·g ⁻¹)	0.000 6
全氮/(g·kg ⁻¹)	2.37	总孔隙容积/(mL·g ⁻¹)	0.005 4

为探究生物炭施用方式和用量对土壤水分、温度和 EC 的影响,于 2021 年播种前在各小区 0—10 cm 土层(0—10 cm 土层的土壤含水量、温度和 EC 对早期作物生长影响最大^[2])埋设土壤温度和水分传感器(HydraProbe II soil sensor, Stevens Water Monitoring Systems),5 月开始实时监测试验区土壤温度、水分(液态水)和 EC,每 30 min 记录 1 次。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及 EC 状况,参考往年气象数据,将冻融期具体划分 3 个阶段:初冻期、冻结期和融解期^[12]。冻结期是指当日最高气温降至 0 ℃ 以下,冻结锋面快速向下移动至土壤冻结深度达到最大,且积雪停止融化的阶段。因此,本研究选择 2022 年 11 月 26 日至 2023 年 2 月 25 日的 1 个完整的冻结期,冻结历时共计 92 天;其中 11 月 28 日是试验田冻结期日温差最小的一天(最小温差这天影响冻结锋面的迁移最慢^[28]),2022 年 12 月 21 日夜晚至 2022 年 12 月 22 日白天试验区降雪[降雪量:2.5~4.9 mm(<https://lishi.tianqi.com/haerbin/202212.html>)],翌年 2 月 12 日是试验田冻结期日温差最大的一天(最大温差这天影响冻结锋面的迁移最快^[28]),因此选择 11 月 28 日,12 月 22 日及前后各 1 天(共 72 h),和翌年 2 月 12 日讨论特殊天气条件下不同生物炭施用方式对冻结期土壤水热及 EC 的影响(表 2)。试验期气温见图 1。本研究只关注冻结期(东北黑土区冬季漫长且有冰雪覆盖,而耕作区无植被覆盖,因此在冻结期间,特别是冻结前期常伴有养分的流失,而冻结中后期常发生较剧烈的土壤结构变化^[2])。

表 2 冻结期前后各处理土壤水热盐数值

Table 2 Values of soil liquid water, temperature, EC for each treatment before and after freezing period

指标	冻结期前			冻结期后		
	CK	HE	HO	CK	HE	HO
土壤液态水/%	8.38	8.40	10.07	9.14	9.21	9.15
土壤温度/℃	-2.66	-2.94	-2.33	-3.19	-3.43	-3.02
EC/(mS·cm ⁻¹)	0.087	0.093	0.108	0.090	0.096	0.097

注:表中数据均为冻结期前后各 1 周的数据。

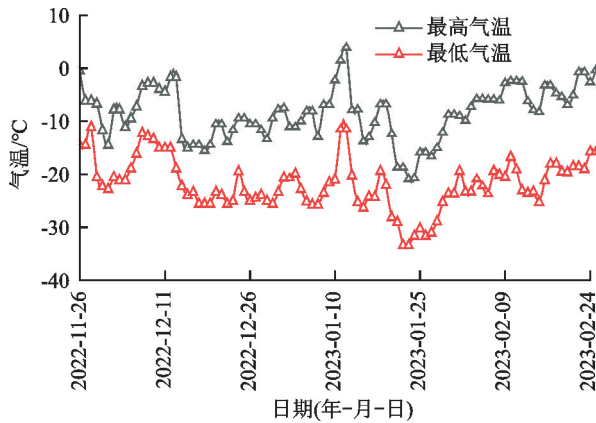
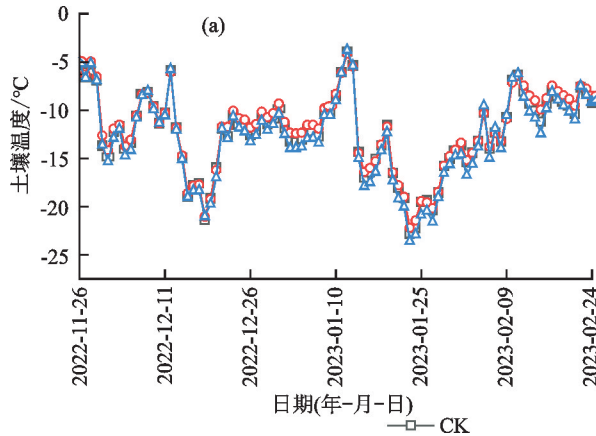


图 1 试验期间日最高气温、日最低气温

Fig. 1 Daily maximum temperature and daily minimum temperature during the experiment



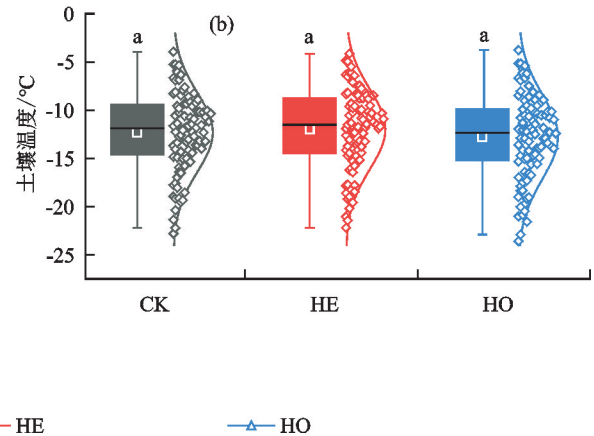
1.3 数据处理

冻结期各处理间土壤水分、温度和 EC 的差异为基于 30 min 的日平均值;降雪前后及最小最大温差日变化各处理间土壤水分、温度和 EC 的差异为基于 30 min 的每小时平均值。利用 Excel 2016 软件进行试验数据的整理,并用 SPSS 21.0 软件进行统计分析。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析生物炭不同处理对土壤水热盐的影响,并用最小显著极差法(LSD 法)进行多重比较($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤温度

2.1.1 冻结期内土壤温度变化 在整个冻结期内,各处理土壤温度随时间变化趋势呈现相似规律(图 2a),各处理土壤平均温度先降低,至 12 月 1 日达到谷值,然后开始升高,至 12 月 12 日达到峰值,而后逐渐降低;12 月 18 日土壤温度再次达到谷值,然后再次继续升高,至翌年 1 月 12 日再次达到峰值,随后逐渐降低,在 1 月 23 日又次达到谷值,而后再次逐渐升高。各处理之间均未达到显著差异($p<0.05$)(图 2b)。与 CK 相比,HE 处理土壤平均温度提高 0.32℃,而 HO 土壤平均温度降低 0.46℃。



注:箱线图中箱体上—表示均值,箱体表示 25%~75%,误差线表示除异常值之外的最大值和最小值,箱体内正方形为平均值;误差线上方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。

图 2 土壤冻结期内土壤温度变化

Fig. 2 Dynamic of soil temperature during the soil freezing period

2.1.2 降雪前后土壤温度变化 降雪前后各处理土壤温度随时间变化趋势呈现相似规律(图 3a),各处理土壤平均温度先逐渐升高,至 13 h(13:00)达到峰值,然后开始降低,至 32 h(8:00)达到谷值,而后逐渐升高;37 h(13:00)土壤温度再次进入峰值,然后继续降低,至 43 h(19:00)进入谷值,随后逐渐升高,在 62 h(14:00)又次达到峰值,而后再次逐渐降低。HE 处理的土壤温度显著高于其他 2 个处理($p<0.05$)(图 3b),CK 处理略高于 HO,但未达到显著差异水平。与 CK 相比,HE 处理土壤平均温

度提高 0.62℃,而 HO 土壤平均温度降低有限(0.000 23℃)。

2.1.3 冻结期单日最小及最大温差土壤温度变化 单日最小温差时段内各处理土壤温度随时间变化趋势呈现相似规律(图 4a),各处理土壤平均温度先逐渐降低,至 7 h 达到谷值,然后开始升高,至 13 h 达到峰值,而后逐渐降低。HE、HO 处理的土壤温度略高于 CK,但未达到显著差异水平(图 4b)。与 CK 处理相比,HE 和 HO 处理土壤平均温度分别提高 0.30、0.16℃。

单日最大温差时各处理土壤温度随时间变化趋势呈现相似规律(图 4c),各处理土壤平均温度先逐渐降低,至 8 h 达到谷值,然后开始升高,至 14 h 达到峰值,而后逐渐降低。HE 处理的土壤温度略高于

CK,CK 处理的土壤温度略高于 HO,但未达到显著差异水平(图 4d)。与 CK 处理相比,HE 处理土壤平均温度提高 0.59 °C,而 HO 土壤平均温度降低 0.20 °C。

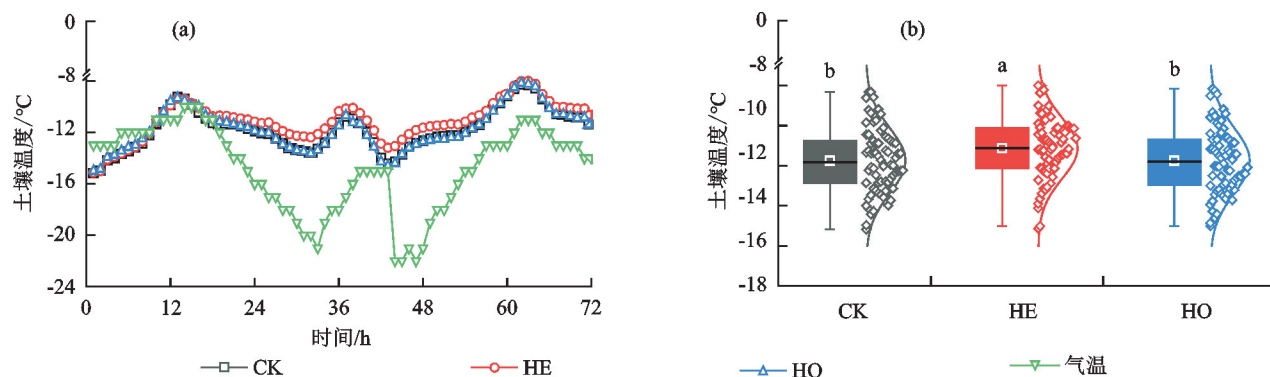
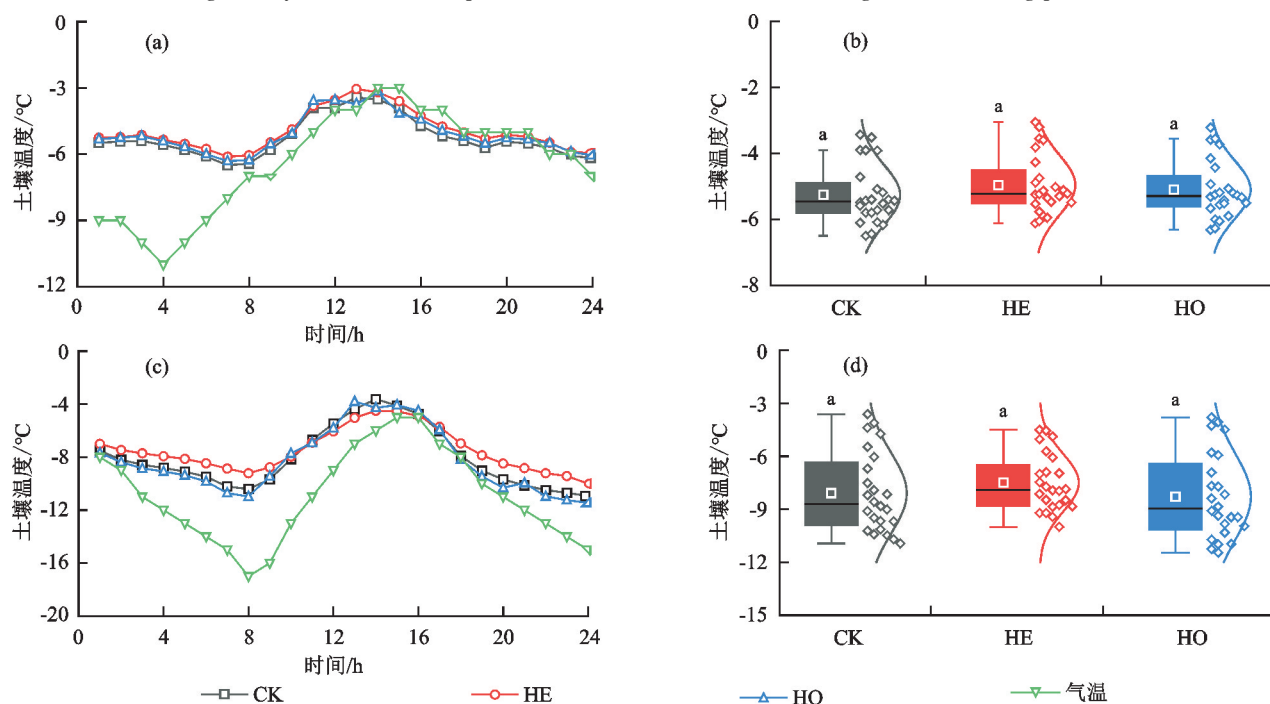


图 3 土壤冻结期内降雪前后土壤温度变化

Fig. 3 Dynamic of soil temperature before and after snowfall during the soil freezing period



注:(a)为 2022—2023 年冻结期内最小温差当天土壤温度随时间变化情况;(b)为 2022—2023 年冻结期内最小温差当天处理之间土壤温度对比;(c)为 2022—2023 年冻结期内最大温差当天土壤温度随时间变化情况;(d)为 2022—2023 年冻结期内最大温差当天处理之间土壤温度对比。

图 4 土壤冻结期内单日最小及最大温差土壤温度变化

Fig. 4 Dynamic of soil temperature during the soil freezing period for single-day minimum and maximum temperature differences

2.2 土壤液态水含量

2.2.1 冻结期内土壤液态水含量变化 冻结期各处理土壤液态水含量随时间变化趋势呈现相似规律(图 5a),各处理土壤平均液态水含量均呈先逐渐降低,至 12 月 19 日达到谷值,然后开始升高,至翌年 1 月 13 日达到峰值,而后逐渐降低;1 月 24 日土壤液态水含量再次进入谷值,而后再继续升高。HO 处理的土壤液态水含量显著高于其他 2 个处理($p < 0.05$)(图 5b),HE 处理略高于 CK,但未达到显著差异水平。与 CK 处理相比,HE 和 HO 处理土壤平均液态水含量分别

提高 1.46%,12.94%。

2.2.2 降雪前后土壤液态水含量变化 降雪前后各处理土壤液态水含量随时间变化趋势呈现相似规律(图 6a),各处理土壤平均液态水含量先逐渐升高,在 18 h(18:00)至 60 h(12:00)之间持续稳定,而后逐渐上升。此外,HO 处理的土壤液态水含量显著高于其他 2 个处理($p < 0.05$)(图 6b),HE 处理略高于 CK,但未达到显著差异水平。与 CK 处理相比,HE 和 HO 处理土壤平均液态水含量分别提高 0.51%,15.02%。

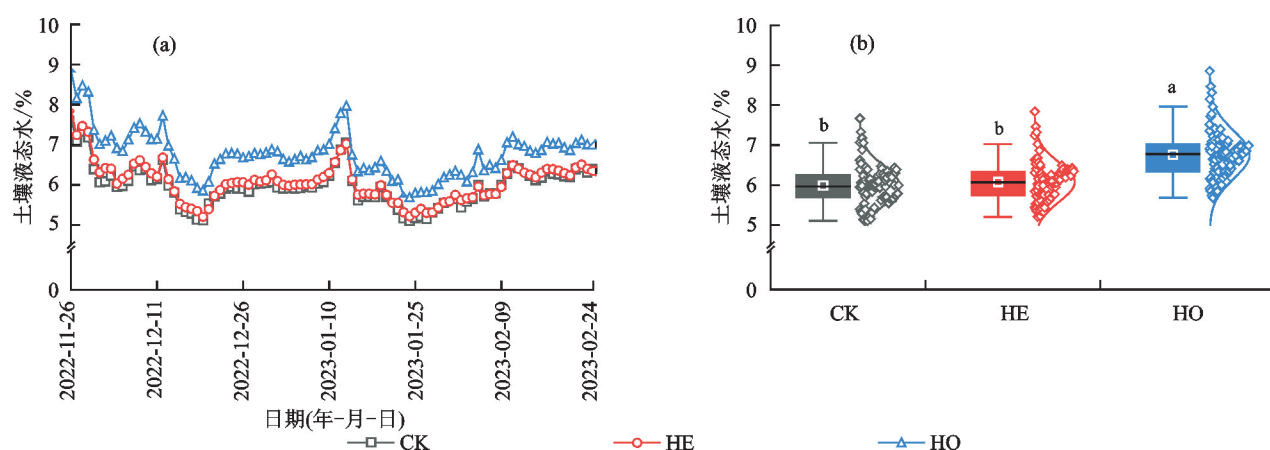


图5 土壤冻结期内土壤液态水含量变化

Fig. 5 Dynamic of soil liquid water content during the soil freezing period

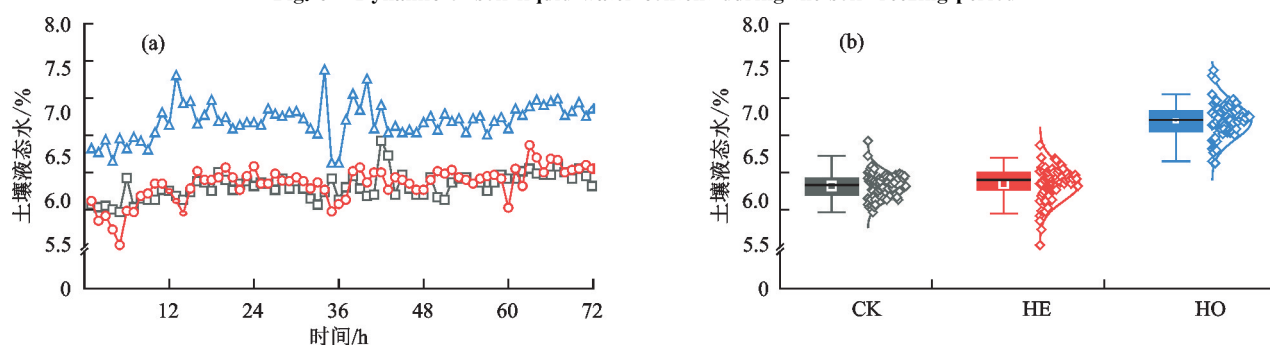


图6 土壤冻结期内降雪前后土壤液态水含量变化

Fig. 6 Dynamic of soil liquid water content before and after snowfall during the soil freezing period

2.2.3 冻结期单日最小及最大温差土壤液态水含量变化 单日最小温差时 HE 及 CK 处理土壤液态水含量随时间变化趋势呈现相似规律(图 7a), HE 及 CK 处理土壤平均液态水含量当日变化相对平稳。HO 处理先逐渐降低,至 9 h 达到谷值,然后开始升高,至 13 h 达到峰值,而后逐渐降低,在 18 h 再次进入谷值,而后达到平稳。HO 处理的土壤液态水含量显著高于其他 2 个处理($p < 0.05$),且 HE 显著高于 CK($p < 0.05$)(图 7b)。与 CK 处理相比,HE 和 HO 处理土壤平均液态水含量分别提高 1.83%,16.09%。

单日最大温差时各处理土壤液态水含量随时间变化趋势呈现相似规律(图 7c),各处理土壤平均液态水含量当日变化相对平稳。HO 处理的土壤液态水含量显著高于其他 2 个处理($p < 0.05$)(图 7d),HE 处理略高于 CK,但未达到显著差异水平。与 CK 处理相比,HE 和 HO 处理土壤平均液态水含量分别提高 0.42%,11.33%。

2.3 土壤 EC

2.3.1 冻结期内土壤 EC 变化 整个冻结期中,各处理土壤 EC 随时间变化趋势呈现相似变化规律(图 8a)。各处理土壤平均 EC 先逐渐降低,至 12 月 18

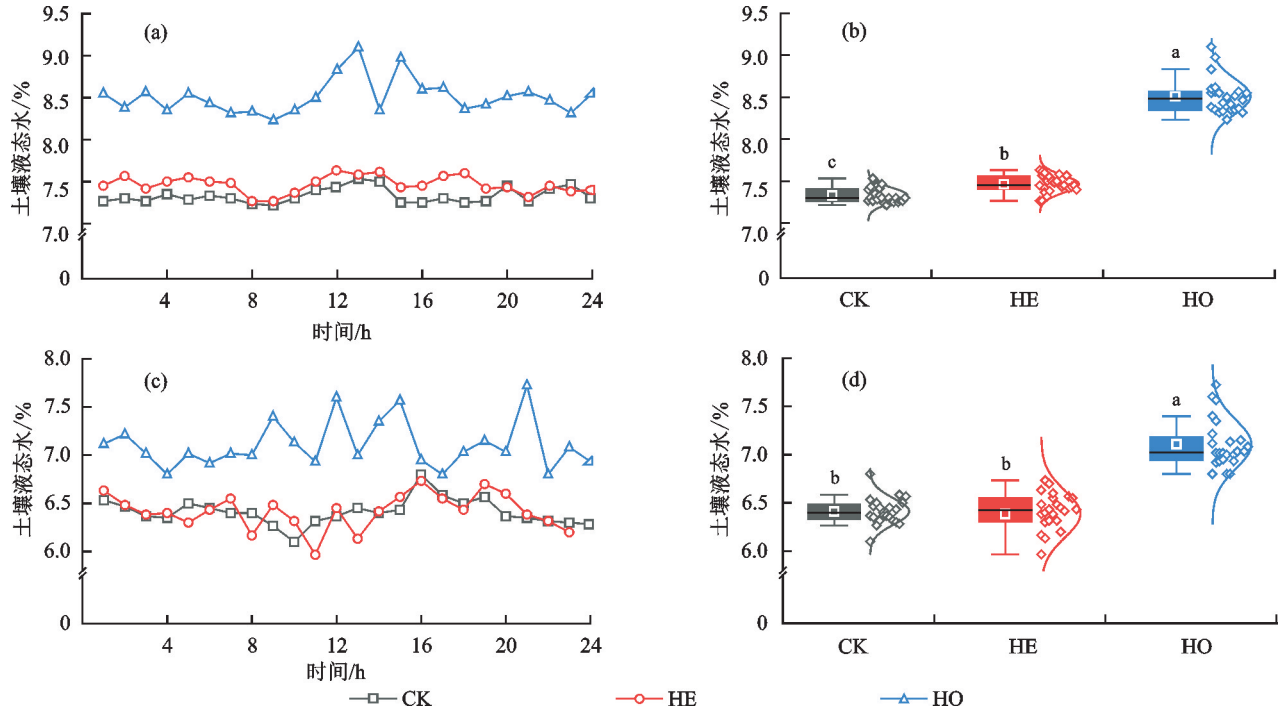
日达到谷值,然后开始升高,至翌年 1 月 13 日达到峰值,而后逐渐降低;1 月 24 日土壤 EC 再次进入谷值,而后再次继续升高。HO 处理的土壤 EC 显著高于其他 2 个处理($p < 0.05$),而 HE 显著高于 CK($p < 0.05$)(图 8b)。与 CK 处理相比,HE 和 HO 处理土壤平均 EC 分别提高 6.89%,17.73%。

2.3.2 降雪前后土壤 EC 变化 降雪前后各处理土壤 EC 随时间变化趋势呈现相似规律(图 9a),各处理土壤平均 EC 先逐渐升高,在 18 h(18:00)至 54 h(6:00)之间相对稳定,而后逐渐上升。HO 处理的土壤 EC 显著高于其他 2 个处理($p < 0.05$),HE 显著高于 CK($p < 0.05$)(图 9b)。与 CK 处理相比,HE 和 HO 处理土壤平均 EC 分别提高 6.86%,19.00%。

2.3.3 冻结期单日最小最大温差土壤 EC 变化 单日最小温差时各处理土壤 EC 随时间变化趋势呈现相似规律(图 10a),各处理土壤平均 EC 当日相对平稳。HO 处理的土壤 EC 显著高于其他 2 个处理($p < 0.05$),HE 显著高于 CK($p < 0.05$)(图 10b)。与 CK 处理相比,HE 和 HO 处理土壤平均 EC 分别提高 6.69%,20.25%。

单日最大温差时各处理土壤 EC 随时间变化趋势呈现不同规律(图 10c),CK 处理土壤平均 EC 当日相较平稳;HO 处理稳定至 8 h 开始逐渐降低,至 11 h 达到谷值,然后开始升高,至 14 h 又恢复稳定。

HO 处理的土壤 EC 显著高于其他 2 个处理($p < 0.05$),HE 显著高于 CK($p < 0.05$)(图 10d)。与 CK 处理相比,HE 和 HO 处理土壤平均 EC 分别提高 5.58%,18.56%。



注:(a)为 2022—2023 年冻结期内最小温差当天土壤液态水含量随时间变化情况;(b)为 2022—2023 年冻结期内最小温差当天处理之间土壤液态水含量对比;(c)为 2022—2023 年冻结期内最小温差当天土壤液态水含量随时间变化情况;(d)为 2022—2023 年冻结期内最大温差当天处理之间土壤液态水含量对比。

图 7 土壤冻结期内单日最小及最大温差土壤液态水含量变化

Fig. 7 Dynamic of soil liquid water content during the soil freezing period for single-day minimum and maximum temperature differences

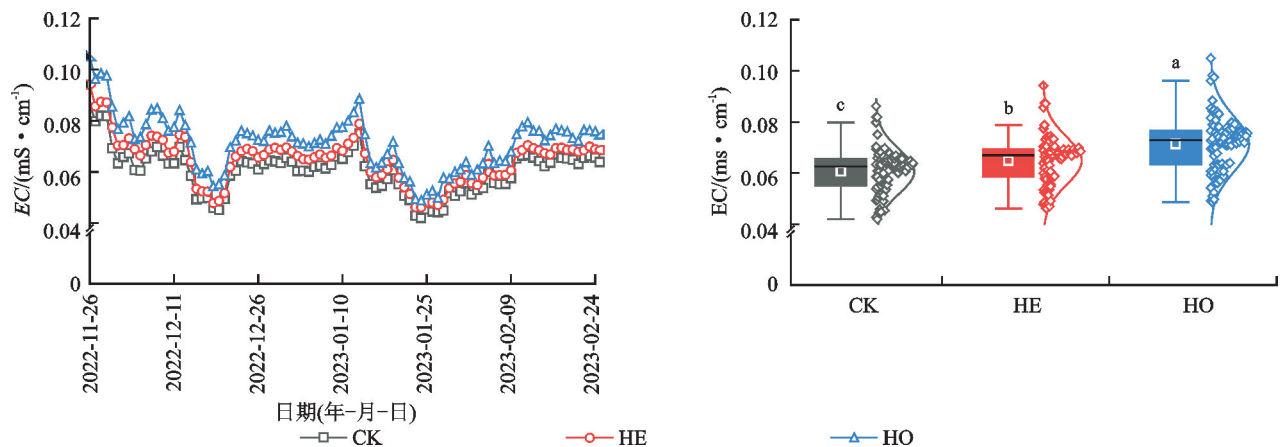


图 8 土壤冻结期内土壤 EC 变化

Fig. 8 Soil EC dynamic during the soil freezing period

2.3.4 冻结期土壤水分、温度与气温及土壤温度、EC 与水分之间的关系 由图 11 可知,土壤液态水随气温的升高而逐渐增加,气温对 HO 处理土壤液态水的影响高于 HE 处理(根据回归方程系数)。土壤温度随气温的升高而升高,气温对 HO 处理土壤温度的影响高于 HE 处理(方程斜率大影响大)。土壤液态水随土壤

温度的增加而升高,HO 处理土壤液态水受土壤温度的影响小于 HE 和 CK 处理;土壤 EC 随着土壤液态水的增加而升高,且 HE 处理土壤液态水对土壤 EC 的影响高于 HO 处理。同时,除土壤液态水与气温拟合的二次函数关系较好外($p < 0.001$),其余均为线性正相关关系拟合较好($p < 0.001$)。

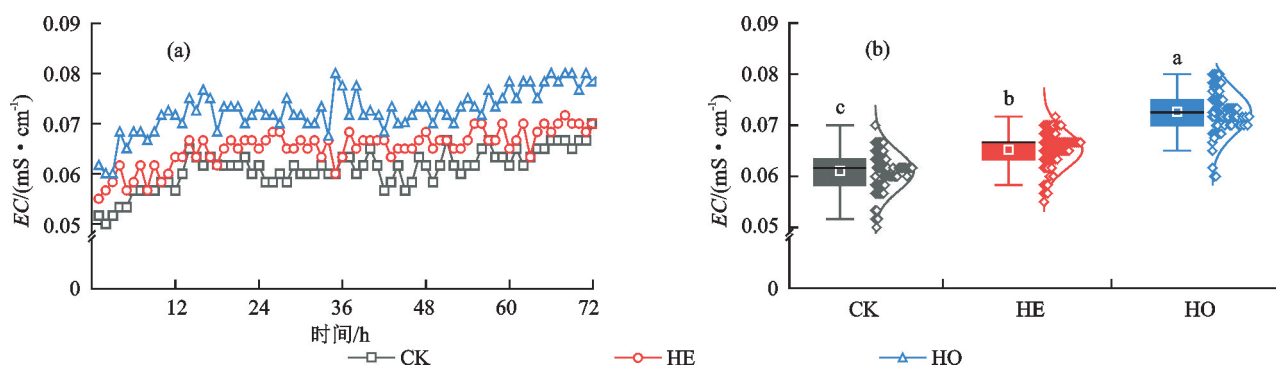
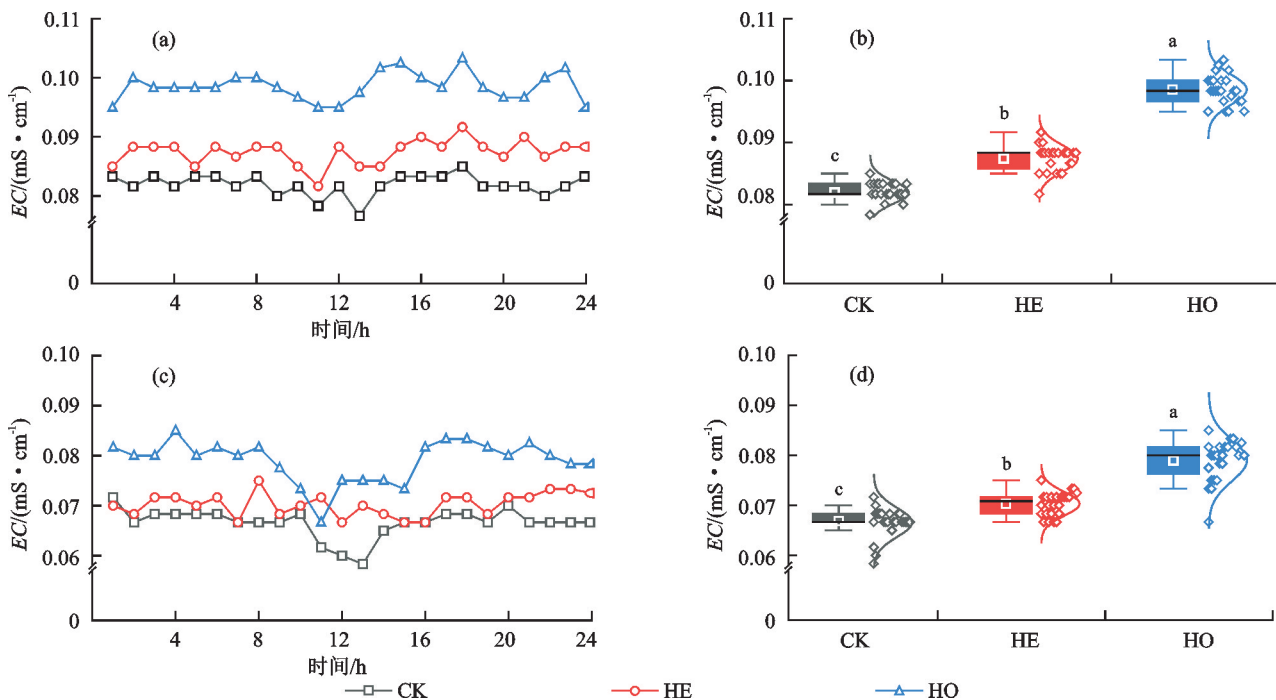


图9 土壤冻结期内降雪前后土壤EC变化

Fig. 9 Soil EC dynamic before and after snowfall during the soil freezing period



注:(a)为2022—2023年冻结期内最小温差当天土壤EC随时间变化情况;(b)为2022—2023年冻结期内最小温差当天处理之间土壤EC对比;(c)为2022—2023年冻结期内最大温差当天土壤EC随时间变化情况;(d)为2022—2023年冻结期内最大温差当天处理之间土壤EC对比。

图10 土壤冻结期内单日最小及最大温差土壤EC变化

Fig. 10 Dynamic of soil EC for single-day minimum and maximum temperature differences during the soil freezing period

3 讨论

3.1 生物炭施用对冻结期土壤温度的影响

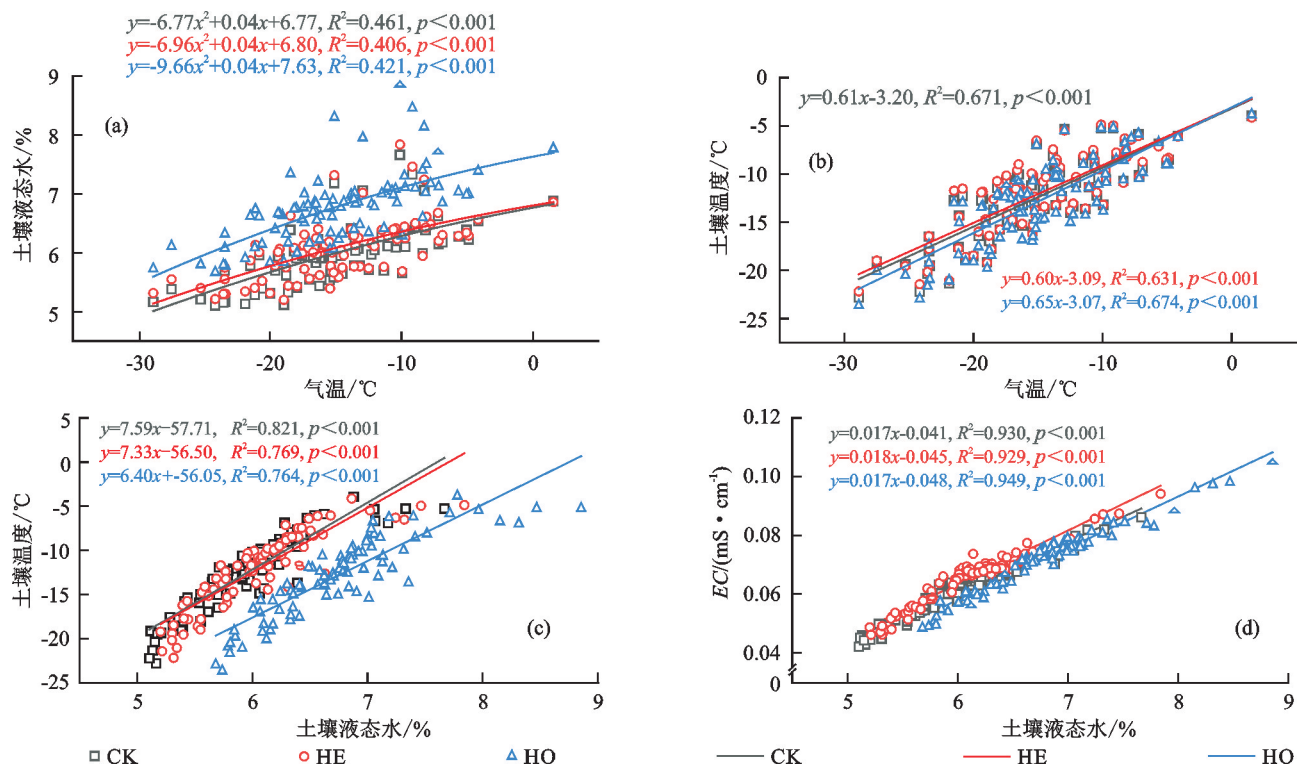
土壤中施用生物炭可改变土壤颜色,提高土壤反照率,进而影响土壤温度^[23]。同时,生物炭的多孔结构为微生物提供良好的生存和生活环境,激发微生物活性,大量的微生物呼吸释放较多的热量储存于土壤中,使土壤具有较好的增温和保温作用^[12];然而,也有研究^[29-30]发现,施用生物炭降低土壤容重、土壤热导率和热扩散,致使土壤日平均温度降低;过量施用生物炭导致总孔隙度增加,加快土壤热量散失^[17]。因此,关于生物炭施用对土壤温度的影响并不总是积极的,且关于冻结期生物炭施用对土壤温度的影响还

缺乏报道,而该过程可能对土壤水盐运移、微生物活性和物质转化过程有重要影响。本研究发现,土壤日温度变化与空气温度变化趋势接近,且土壤温度峰值比空气温度峰值出现提前2 h左右;同时回归方程分析也发现,土壤温度随气温的升高而升高(图11b),这说明冻结期耕层土壤温度同时受到空气温度和地下向上传导温度的双重影响。本研究发现,2种生物炭施用方式对土壤温度的影响也不同,与CK相比,HE处理提高整个冻结期的土壤平均温度,而HO降低土壤平均温度。这可能是由于HO(混施)处理表层土壤孔隙度比HE(底施)高^[25];增加表层土壤与空气和深层土壤进行气体交换,进而增加热量损失。同

时,土壤温度还受到土壤比热容的影响,土壤液态水含量较高时土壤温度提升较为缓慢^[17],HO 处理的表层土壤液态水含量显著高于 HE,且表层土壤受接触的雪和低温空气影响,其冻结期升温能力也较弱,这也可能是其温度相对较低的原因。值得关注的是即使 HO 土壤颜色较深,其吸收太阳辐射增温能力较强,但是冻结期间其对土壤温度升高的程度有限。此外,HE 处理表层土壤液态水含量比 HO 处理低,较 HO 土壤热传导率更高^[31];且生物炭本身含有亲水基团和吸水特性^[20],底施生物炭可增加 20 cm 处土壤液态水含量和比热容,其 20 cm 处自下而上传导的热量可有效缓解气温的波动^[32],这可能也是其温度相对较高的原因。

本研究还发现,生物炭施用方式对土壤温度的调节还受到外界天气变化以及极端天气的影响,从降雪前 24 h 到降雪后的 48 h,HE 处理土壤温度显著高于 HO 和 CK。这也是因为混施生物炭降低土壤导热系数^[17],经太阳辐射土壤热传导自上而下变慢,同时地下深层热量向上传导也变慢,而 HE 相对于 HO 对 0—20 cm 土层土壤结构影响有限,土壤导热系数

更高,热传导更快^[30]。同时,生物炭本身含有亲水基团和吸水特性^[20],HE 相较于 CK,其 20 cm 处施用的生物炭可吸收更多的来自于上层土壤水分,进而增加 20 cm 处土壤液态水含量和比热容,导致自下而上传导的热量有效缓解耕层土壤随外界温度的波动^[5]。因此 HE 表层土壤温度对外界温度的变化反应相对滞后^[33]。已有研究^[24]表明,降雪覆盖隔绝地表反射,并缩小处理之间的差异,进而削减混施生物炭的吸热能力,这与本研究结果相似。因此,在降雪条件下生物炭底施(HE)相较于混施(HO)更有利于提升耕层土壤温度,保温效果更好,减小土壤温度波动。此外,本研究发现,在最小温差当天,HO 处理也表现出保温效果,但 HE 保温效果更好。这可能是由于当天土壤裸露,HO 相较于 HE 及 CK 接收太阳辐射能效率更高^[24],但 HO 处理也因为土壤孔隙度增加,引起土壤热量散失严重,导致保温效果不如 HE。因此,在整个冻结期和特殊气候条件下,HE 更有利于提升耕层土壤温度,这可能影响土壤结构、微生物活动和物质循环等,也影响到冻融期和春季土壤温度,进而影响土壤肥力和早期作物生长。



注: (a) 为 2022—2023 年冻结期土壤液态水与气温变化关系; (b) 为 2022—2023 年冻结期土壤温度与气温变化关系; (c) 为 2022—2023 年冻结期土壤温度与土壤液态水变化关系; (d) 为 2022—2023 年冻结期土壤 EC 与土壤液态水变化关系。

图 11 冻结期土壤水分、温度与气温及土壤温度、EC 与水分之间的关系

Fig. 11 Relationships between soil moisture, temperature and air temperature and soil temperature, EC and moisture during the freezing period

3.2 生物炭施用对冻结期土壤液态水的影响

土壤水分是影响作物生长发育的重要因素^[34-35]。已有研究^[36]发现,砂质壤土中施加生物炭可以增加土壤毛管孔隙,提高土壤水分,进而起到节水保墒的功效^[31,34]。然而,在质地较轻的土壤中施加生物炭(80 t/hm²)则结果相反,这是由于生物炭中疏水基团发挥作用,且生物炭施用降低土壤通透性,进而降低土壤持水性^[18-19]。生物炭施用能显著提高冻融期土壤的含水量^[7]、储水量^[10,12]和保水能力^[37],进而通常有利于冻融期结束后春季作物出苗。因为冻结期土壤水分变化也将影响到冻融期土壤水分变化,同时冻结期土壤水分变化显著影响土壤结构^[4,7-8],因此研究生物炭施用对冻结期土壤水分(液态水)的影响也具有重要意义。本研究发现,受地表和深土层温度的影响,冻结期土壤中同样存在液态水,且土壤水分(液态水)在水势的驱动下可能发生运动(图5、图6、图7);相对CK,冻结期HO和HE耕层土壤液态水含量增加,并在降雪前后和最大温差条件下也出现同样的结果,且HO处理均显著高于HE和CK处理。这可能是由于,相比较于HE(底施)和CK,HO(混施)处理土壤颜色更深,其吸收太阳辐射能更强,导致其表层土壤温度升高幅度相对较大,进而增加该处理液态水含量^[9,24]。相比较于HE和CK,HO处理提高表层土壤毛管孔隙^[25],因此其非冻结期时土壤蓄水保水能力较强。受冻结期外界温度变化影响,土壤液态水含量也随之发生变化,且可能在土体中发生运移;同时,受冻结期表层土壤水分自上而下逐渐冻结的影响,土壤孔隙变小,未冻结水分因毛管力的作用向上迁移,且因为生物炭吸收土壤水分而导致其在低温时发生冻胀,进而破坏生物炭的完整性而增加生物炭的孔容和比表面积^[38],导致HO更有利于提高土壤液态水含量。而HE(底施)处理可能通过改变整个土体结构,加上生物炭本身的亲水基团和吸水特性,增加秋季20 cm土层处的水分^[20],致使冻结期的土壤液态水含量也增加^[17]。此外,在最小温差条件下HO和HE处理均显著提高耕层土壤液态水含量,且HO增加幅度大于HE。这可能是HO处理生物炭与耕层土壤混合施用提高土壤对液态水的吸附能力,且EC通常处于较高水平,降低土壤溶液的冰点,进而提高表土层土壤液态水含量,而HE处理底施生物炭吸收上层土壤水分至20 cm处,且0—20 cm土层土壤EC低于HO处理^[8],故HO土壤液态水含量更高。因此,在整个冻结期和特殊天气条件下,生物炭

均可增加耕层土壤液态水含量,且HO处理的效果优于HE;同时,这些液态水及其携带的盐分运移对于东北地区春季十年九旱,抗旱保墒,提高作物出苗率可能有重要意义。

3.3 生物炭施用对冻结期土壤EC的影响

适宜浓度的土壤盐分离子是作物生长发育的关键,盐分过多导致土壤盐碱化和作物产量下降等问题^[22]。生物炭因其较大的比表面积和特殊的多孔结构,可促进阳离子交换反应并吸附土壤中盐分,进而降低土壤EC^[16];然而,生物炭对土壤盐分的影响受土壤类型、原材料和施用量等多因素共同作用^[39]。我国内蒙古半干旱地区,砂壤土的EC随着玉米秸秆生物炭施用量的增加而增加^[28]。刘易等^[22]研究发现,棉花秸秆生物炭施用低于8%时,降低不同程度盐渍化土壤中盐含量,而8%生物炭处理增加土壤含盐量,这与“土壤—生物炭”对土壤溶液中离子的竞争吸附平衡有关。据报道^[40],典型黑土的盐基饱和度较高(>50%),其吸附能力较强,但还远小于生物炭的吸附能力^[41]。本研究中,整个试验周期内生物炭施用均显著增加土壤EC,以及在降雪前后和最大最小温差条件下生物炭施用也均显著增加土壤EC,且HO高于HE。这可能是因为作物生长季,施肥导致生物炭吸附大量的可溶性盐,混施(HO)导致0—20 cm整个土层EC均增加,而底施(HE)只在底层20 cm处附近有较强的吸附作用,只增加20 cm附近的EC^[14]。同时,冻结过程HO处理EC通常处于较高水平,降低土壤溶液的冰点,这也有利于增加HO处理的土壤液态水,进而减少盐分的析出^[42]。因此,HO处理相较于HE更有利于提高耕层土壤EC,增加土壤中盐分离离子,增强土壤苗期的供肥能力,有利于作物幼苗的早期生长。

4 结论

生物炭混施(HO)和底施(HE)均有利于提升冻结期黑土耕层液态水含量和EC,特别是HO更有利于提升冻结期黑土耕层液态水含量和EC,而HE更有利于提升耕层土壤温度。

(1)2种生物炭施用方式均增加冻结期的土壤平均液态水含量,HO处理的土壤液态水含量显著高于其他2个处理。最小温差当天HE处理土壤液态水含量显著高于CK。

(2)整个冻结期和降雪前后HE处理均提高土壤平均温度,而HO处理降低土壤平均温度。最小温差当天HO处理也呈现出较好的保温效果,但整个试验周期和特殊天气状况下土壤平均温度均表现为

HE>HO。

(3)整个试验周期内生物炭施用均显著增加土壤 EC,且 HO 处理的增加量高于 HE 处理。

(4)HE 处理降低冻结期土壤液态水、温度及 EC 的变化幅度。

参考文献:

- [1] 刘宝元,张甘霖,谢云,等.东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J].科学通报,2021,66(1):96-106.
LIU B Y, ZHANG G L, XIE Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of north-eastern China[J].Chinese Science Bulletin, 2021, 66(1): 96-106.
- [2] 赵显波.黑土坡耕地冻融过程中水热及营养盐分布实验与分析[D].辽宁 大连:大连理工大学,2019.
ZHAO X B. Distribution of water heat and nutrients during freezing and thawing of black soil slope farmland experiment and analysis [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2019.
- [3] 晁华,王当,龚强,等.东北地区冻土的时空变化特征[J].现代农业科技,2019(18):144-147,153.
CHAO H, WANG D, GONG Q, et al. Spatial and temporal change of frozen soil in Northeast China[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019 (18):144-147,153.
- [4] ZUO Y T, MENG F X, LI T X, et al. Effect of biochar application on freezing-thawing deformation of farmland soil during freeze-thaw cycling[J].Geoderma, 2022, 405: e115510.
- [5] HOU R J, LI T X, FU Q, et al. Effect of snow-straw collocation on the complexity of soil water and heat variation in the Songnen Plain, China[J].Catena, 2019, 172: 190-202.
- [6] 武玉,徐刚,吕迎春,等.生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J].地球科学进展,2014,29(1):68-79.
WU Y, XU G, LÜ Y C, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: Current status and knowledge gaps [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(1): 68-79.
- [7] 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].The Science of the Total Environment, 2019, 694: e133732.
- [8] 彭振阳.单向冻结土壤中水分、热量和溶质耦合迁移机理与模拟[D].武汉:武汉大学, 2015.
PENG Z Y. Mechanism and modeling of coupled water-heat-solute movement in unidirectional freezing soils [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [9] 吕梦凡,马向成,蔡铁,等.生物炭施用对冬麦田土壤水热环境及土壤呼吸的影响[J].干旱地区农业研究, 2022, 40(3):197-206.
LÜ M F, MA X C, CAI T, et al. Effects of biochar application on soil hydrothermal environment and soil respiration in winter wheat field[J].Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3):197-206.
- [10] 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, 39(5):2412-2419.
YAN H T, YIN Q Y, DING S S, et al. Effect of biochar amendment on physicochemical properties and fungal community structures of cinnamon soil[J].Environmental Science, 2018, 39(5):2412-2419.
- [11] FENG W Y, YANG F, CEN R, et al. Effects of straw biochar application on soil temperature, available nitrogen and growth of corn[J].Journal of Environmental Management, 2021, 277: e111331.
- [12] 张如鑫,屈忠义,王丽萍,等.生物炭对冻融期盐渍化土壤水热肥效应的影响[J].水土保持学报, 2022, 36(5): 296-303.
ZHANG R X, QU Z Y, WANG L P, et al. Effect of biochar on water, heat and fertilizer of saline soil during freezing thawing period[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5):296-303.
- [13] 阮冬梅.冻结过程中盐渍土水热盐运移规律及多场耦合模拟研究[D].长春:吉林大学, 2023.
RUAN D M. Study on the law of water, heat and salt transport and multi-field coupling simulation in saline soil during freezing process[D].Changchun:Jilin University, 2023.
- [14] 谢文达,智燕彩,李玘,等.杏壳生物炭对温室次生盐渍化土壤修复效应的研究[J].土壤通报, 2019, 50(2): 407-413.
XIE W D, ZHI Y C, LI Q, et al. Effects of biochar on the restoration of secondary salinized soil in greenhouse[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(2):407-413.
- [15] 董飞,闫秋艳,段增强,等.生物炭对不同浇水条件下冬小麦产量及水分利用效率的影响[J].华北农学报, 2020, 35(1):149-157.
DONG F, YAN Q Y, DUAN Z Q, et al. Effects of biochar addition on yield and water use efficiency of winter wheat under different irrigation conditions[J].Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(1):149-157.
- [16] 依文莲,邵光成,吴世清,等.咸水灌溉下施加生物炭对土壤盐分分布及团粒结构的影响[J].中国农村水利水电, 2022(6):154-161,168.
NONG W L, SHAO G C, WU S Q, et al. Effects of biochar on soil salt distribution and aggregate structure under brackish water irrigation[J].China Rural Water

- and Hydropower, 2022(6):154-161,168.
- [17] 邹瑞哈,吕德生,王振华,等.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[J].水土保持学报, 2022,36(3):220-227.
- ZOU R H, LÜ D S, WANG Z H, et al. Effects of biochar application during the nonirrigation season on soil structure and hydrothermal characteristics in drip irrigated cotton field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):220-227.
- [18] DUGAN E, VERHOEF A, ROBINSON S, et al. Biochar from sawdust, maize stover and charcoal: Impact on water holding capacities (WHC) of three soils from Ghana[C]//GILKES R J, PRAKPONGKEP N. Proceedings of 19th World Congress of Soil Science, Soil Science Soil Solutions for a Changing World. Brisbane, Australia: International Union of Soil Sciences, 2010, 4(2):9-12.
- [19] 高海英,何绪生,耿增超,等.生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J].中国农学通报, 2011,27(24):207-213.
- GAO H Y, HE X S, GENG Z C, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011,27(24):207-213.
- [20] 张新学,张国辉,王效瑜,等.不同栽培模式下生物炭对土壤水分保持能力的影响[J].农业科学研究, 2017,38(1):44-47.
- ZHANG X X, ZHANG G H, WANG X Y, et al. Effects of biological carbon on soil water retention capacity under different cultivation patterns[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2017,38(1):44-47.
- [21] 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.
- [22] 刘易,孟阿静,黄建,等.生物质炭输入对盐胁迫下玉米植株生物学性状的影响[J].干旱地区农业研究, 2018,36(2):16-22,249.
- LIU Y, MENG A J, HUANG J, et al. Effect of biomass carbon input on corn biological index cultivated under saline stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018,36(2):16-22,249.
- [23] LIU Z L, DUGAN B, MASIELLO C A, et al. Effect of freeze-thaw cycling on grain size of biochar[J]. PLoS One, 2018,13(1):e0191246.
- [24] 张阳阳,胡学玉,邹娟,等.生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响[J].环境科学, 2017,38(4):1622-1632.
- ZHANG Y Y, HU X Y, ZOU J, et al. Effects of biochar on surface albedo and soil respiration in suburban agricultural soil[J]. Environmental Science, 2017,38(4):1622-1632.
- [25] YAN S H, ZHANG S L, YAN P K, et al. Effect of biochar application method and amount on the soil quality and maize yield in Mollisols of Northeast China[J]. Biochar, 2022,4(1):e56.
- [26] ZHANG Q M, SALEEM M, WANG C X. Effects of biochar on the earthworm (*Eisenia foetida*) in soil contaminated with and/or without pesticide mesotrione[J]. The Science of the Total Environment, 2019,671:52-58.
- [27] 沈渭寿,曹学章,沈发云.中国土地退化的分类与分级[J].生态与农村环境学报, 2006,22(4):88-93.
- SHEN W S, CAO X Z, SHEN F Y. Classification and grading of land degradation in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006,22(4):88-93.
- [28] 石净.施用生物炭与秸秆对土壤冻结锋面迁移特性及融雪水入渗过程的影响[D].哈尔滨:东北农业大学, 2023.
- SHI J. Effects of biochar and straw application on the migration characteristics of soil freezing front and infiltration process of snowmelt water[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
- [29] WANG X F, LI Y, WANG H R, et al. Targeted biochar application alters physical, chemical, hydrological and thermal properties of salt-affected soils under cotton-sugarbeet intercropping[J]. Catena, 2022,216:e106414.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- CHEN W F, ZHANG W M, MENG J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013,46(16):3324-3333.
- [33] 王月玲,耿增超,王强,等.生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响[J].环境科学, 2016,37(9):3634-3641.
- WANG Y L, GENG Z C, WANG Q, et al. Influence of biochar on greenhouse gases emissions and physico-chemical properties of loess soil[J]. Environmental Science, 2016,37(9):3634-3641.
- [34] PERREAULT S, CHOKMANI K, NOLIN M C, et al. Validation of a soil temperature and moisture model in southern Quebec, Canada[J]. Soil Science Society of A-

- merica Journal, 2013, 77(2): 606-617.
- [35] 刘园, JAMAL K M, 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.
- LIU Y, JAMAL K M, JIN H Y, et al. Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 849-858.
- [36] 潘全良, 陈坤, 宋涛, 等. 生物炭及炭基肥对棕壤持水能力的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 115-121.
- PAN Q L, CHEN K, SONG T, et al. Influences of biochar and biochar-based compound fertilizer on soil water retention in brown soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 115-121.
- [37] FU Q, YAN J W, LI H, et al. Effects of biochar amendment on nitrogen mineralization in black soil with different moisture contents under freeze-thaw cycles[J]. Geoderma, 2019, 353: 459-467.
- [38] 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.
- JU W L, JING Y D. Effect of aging treatment on physicochemical characteristics of cotton straw biochar[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(10): 3853-3861.
- [39] ZHAO W, ZHOU Q, TIAN Z Z, et al. Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 722: e137428.
- [40] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- GONG Z T, ZHANG G L, CHE Z C, et al. Soil genesis and system classification[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [41] 朱继荣, 孙崇玉, 于红梅, 等. 生物炭对土壤肥力与环境的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(3): 65-69, 73.
- ZHU J R, SUN C Y, YU H M, et al. Effects of biochar on soil fertility and environment[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(3): 65-69, 73.
- [42] 王晓巍. 北方季节性冻土的冻融规律分析及水文特性模拟[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- WANG X W. Study of soil freezing and thawing law and Simulation of hydrologic properties in the northern seasonally frozen soil area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010.
- (上接第 321 页)
- [31] 詹振芝, 黄炎和, 蒋芳市, 等. 砾石含量及粒径对崩岗崩积体渗透特性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 85-90, 95.
- ZHAN Z Z, HUANG Y H, JIANG F S, et al. Effects of content and size of gravel on soil permeability of the colluvial deposit in Benggang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 85-90, 95.
- [32] ILEK A, KUCZA J, WITEK W. Using undisturbed soil samples to study how rock fragments and soil macropores affect the hydraulic conductivity of forest stony soils: Some methodological aspects[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 132-140.
- [33] 党宏宇, 陈洪松, 邵明安. 喀斯特地区不同层次土石混合介质对土壤水分入渗过程的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 38-43.
- DANG H Y, CHEN H S, SHAO M A. Effects of laminated rock fragments on soil infiltration processes in Karst regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 38-43.
- [34] 于皓, 董智, 杨建英, 等. 基于 CT 扫描的不同土地利用类型土壤大孔隙特征及其入渗能力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(3): 55-61.
- YU H, DONG Z, YANG J Y, et al. Study on soil macropore characteristics and infiltration capacity of different land use types based on CT scanning[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(3): 55-61.
- [35] LESSOVAIA S N, DULTZ S, PLÖTZE M, et al. Soil development on basic and ultrabasic rocks in cold environments of Russia traced by mineralogical composition and pore space characteristics[J]. Catena, 2016, 137: 596-604.
- [36] 李江文, 冉卓灵, 韩珍, 等. 含岩屑紫色土水分扩散规律[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 178-185.
- LI J W, RAN Z L, HAN Z, et al. Water diffusion law of purple soil containing rock fragments[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 178-185.
- [37] 孟晨, 牛健植, 余海龙, 等. 土壤大孔隙三维特征影响因素和测定方法研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 9-16.
- MENG C, NIU J Z, YU H L, et al. Research progress in influencing factors and measuring methods of three-dimensional characteristics of soil macropores[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(11): 9-16.
- [38] 王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 167-174.
- WANG H L, JIANG S Y, CUI J F, et al. Quantitative evaluation of macropore flow in purple soil of sloping cropland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 167-174.