

土壤混掺生物炭对微咸水蒸发特性的影响

郑健^{1,2,3}, 孙强^{1,2}, 石聪^{1,2}, 宿智鹏^{1,2}, 王春霞⁴

(1.兰州理工大学能源与动力工程学院,兰州 730050;2.甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室,兰州 730050;3.西北低碳城镇支撑技术协同创新中心,兰州 730050;4.临夏回族自治州水利科学研究院,甘肃 临夏 731100)

摘要:为探究不同生物炭混掺量对微咸水蒸发特性的影响,采用离心机试验和室内土柱模拟试验,设置 3 个生物炭质量添加比例(B_0 、 B_2 、 B_4)和 4 个微咸水矿化度(W_0 、 W_1 、 W_3 、 W_5),分析不同处理对微咸水蒸发下的土壤水分特征曲线、孔隙分布、累积蒸发量、盐分运移、土壤温度日变幅的影响,并应用蒸发模型进行拟合分析。结果表明:生物炭和微咸水联合应用下能提高土壤持水能力,增加土壤中的较大孔隙和较小孔隙的比例;土壤累积蒸发量随着生物炭混掺量的增加先减少后增加,生物炭混掺量为 2%时可以更好地抑制微咸水蒸发;Rose 蒸发模型可以较好地拟合微咸水蒸发;土壤中混掺生物炭可以降低盐分表聚,使其在土壤中均匀分布;混掺生物炭可以有效降低土壤温度日变幅;相同生物炭施用量下,矿化度为 3 g/L 的微咸水,可以降低 0—10 cm 土层土壤平均温度,提高 10—50 cm 土层土壤平均温度。综合考虑各项指标,处理 B_2W_3 的生物炭和微咸水更适宜农田施用,为西北干旱地区更好地利用微咸水灌溉提供理论依据。

关键词:生物炭;微咸水蒸发;累积蒸发量;盐分运移;土壤温度

中图分类号:S152.7⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2023)04-0294-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.04.036

The Effect of Soil Mixed with Biochar on Brackish Water Evaporation Characteristics

ZHENG Jian^{1,2,3}, SUN Qiang^{1,2}, SHI Cong^{1,2}, SU Zhipeng^{1,2}, WANG Chunxia⁴

(1.College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050;

2.Key Laboratory of the System of Biomass Energy and Solar Energy Complementary Energy Supply System

in Gansu, Lanzhou 730050; 3.Collaborative Innovation Center for Supporting Technology of Northwest Low-Carbon Towns, Lanzhou 730050; 4.Linxia Hui Autonomous Prefecture Institute of Water Resources Science, Linxia, Gansu 731100)

Abstract: The effects of different biochar mixing amounts on the evaporation characteristics of brackish water were investigated by centrifuge test and indoor soil column simulation test. Three biochar mass addition ratios (B_0 , B_2 and B_4) and four brackish water salinity ratios (W_0 , W_1 , W_3 and W_5) were set up in the experiment. The effects of different treatments on soil water characteristic curve, pore distribution, cumulative evaporation, salt transport and daily variation of soil temperature under brackish water evaporation were analyzed, and the evaporation model was used for fitting analysis. The results showed that the combined application of biochar and brackish water could improve soil water holding capacity of soil and increase the proportion of larger and smaller pores in soil; The cumulative evaporation of soil water first decreased and then increased with the increase of biochar mixture, when the biochar mixture was 2%, brackish water evaporation could be inhibited better; Rose evaporation model could fit brackish water evaporation well; Biochar mixing in soil could reduce the surface accumulation of salt and make it evenly distributed in soil; Biochar could effectively reduce the diurnal variation of soil temperature; With the same amount of biochar application, brackish water with a salinity of 3 g/L could reduce the average soil temperature of 0—10 cm and increase the average soil temperature of 10—50 cm. Taking all the indexes into consideration, the biochar

收稿日期:2022-12-16

资助项目:国家自然科学基金项目(51969012);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-33);济南市水务科技项目(JNSWKJ202206);兰州理工大学红柳一流学科建设项目(0807J1)

第一作者:郑健(1981—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究。E-mail:zhj16822@126.com

通信作者:郑健(1981—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究。E-mail:zhj16822@126.com

and brackish water treated with B_2W_3 are more suitable for farmland application, which provides a theoretical basis for better utilization of brackish water irrigation in arid areas of Northwest China.

Keywords: biochar; brackish water evaporation; cumulative evaporation; salt transport; soil temperature

西北地区耕地资源丰富,是未来国家保障耕地安全和粮食安全的重要区域^[1]。但西北地区受气候条件变化和工业快速发展的影响加剧能源和粮食生产对水资源的竞争,对区域内本就匮乏的水资源如何高效利用提出更高要求^[2]。而中国西北地区的地下微咸水(矿化度 2~5 g/L)储量约为 88.7 亿 m^3 ^[3],如果能科学合理地利用,就能够为西北地区水资源匮乏的问题提供解决途径^[4]。

微咸水在提供作物生长所需要的水分的同时,也给土壤带入盐分,造成土壤盐渍化的潜在危险^[5]。与此同时,西北地区降雨量少,蒸发量大,土壤中盐分在蒸发作用和温度变化的影响下,更容易向土壤表层累积,形成表层土壤的盐渍化,对作物根系造成盐分胁迫,降低作物根系的有效吸水量,导致作物减产和品质降低^[6]。因此,如何降低微咸水灌溉条件下盐分受蒸发作用在表层土壤的累积量,减少盐分在作物根层的聚集,对于缓解西北地区淡水资源匮乏、保障粮食安全有着重要的意义。生物炭是生物有机材料在缺氧或无氧的条件下,经热裂解后产生的固体有机物^[7],具有多孔隙结构和较大的比表面积,可有效改善土壤水力特性^[8]。生物炭的特性使其作为一种新型土壤改良剂施入后可以改变土壤的结构组成,从而影响水分蒸发。孙泉沁等^[9]研究表明,随着生物炭施用量的增加,盐渍土壤容重降低,土壤总孔隙度和大孔隙度增加;Wang 等^[10]研究发现,生物炭施用量为 10 t/hm² 增加土壤含水量和土壤加权平面储水量,施用生物炭可降低土壤平均温度的波动;李帅霖等^[11]研究表明,施用用量和施用深度为 4%、10 cm 和 2%、20 cm 时可减少田间土壤无效蒸发;而许健等^[12]研究发现,生物炭添加量 5% 时能有效抑制土壤蒸发,添加量过高则可能促进土壤蒸发。从现有的研究来看,生物炭混掺对土壤水分蒸发和微咸水入渗影响的研究较多,而对于蒸发条件下微咸水灌溉协同生物炭对盐分运移和温度变化的研究还显欠缺。

基于此,本文采用室内土柱蒸发模拟试验,将生物炭能够改善土壤结构和土壤水力特性的特点与微咸水相结合,通过设置不同的微咸水矿化度和生物炭混掺量,探求生物炭混掺对微咸水蒸发、盐分运移和温度变化的影响,为微咸水在实际农业生产中的科学管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

(1)供试土壤。室内土柱试验于 2021 年 10 月至 2022 年 5 月在兰州理工大学能源与动力工程学院水工实验室进行,试验周期内采用空调将室内温度控制在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。试验土壤取自甘肃省兰州市魏岭乡狗牙村 $(36^\circ 02' \text{N}, 103^\circ 47' \text{E})$ 农田的表层土壤(0—40 cm),经过自然风干、碾压、去除杂物后过 2 mm 筛备用。土壤机械组成利用土壤比重计(TM—85)进行测定,砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm)含量分别为 24.30%、55.77%、19.93%,依据国际制土壤质地分类标准,供试土壤质地为粉壤土。

(2)供试生物炭。试验所用生物炭采购于河南誉中奥农业科技有限公司,以小麦秸秆为原料,生物炭颗粒大小为 2~4 mm,固定碳含量为 650 g/kg,速效磷含量为 10.2 g/kg,速效钾含量为 55.65 g/kg,碳化时间为 4~6 h,裂解温度为 550~600 $^\circ\text{C}$,容重为 0.19 g/cm³,比表面积为 9 m²/g,总孔隙度为 67.03%,通气孔隙度为 12.87%,持水孔隙度为 61.10%,pH 为 10.24,阳离子交换量为 60.8 cmol/kg。

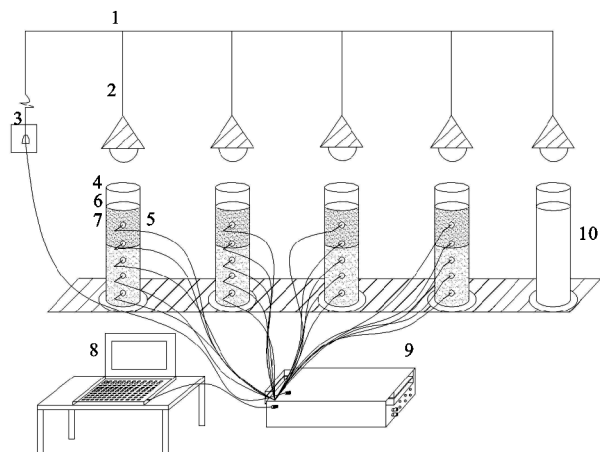
(3)供试微咸水。根据西北地区地下微咸水盐分组成特点,采用化学试剂和去离子水配置不同矿化度的微咸水,将 NaCl、CaCl₂、Mg₂SO₄ 3 种化学试剂(天津市百世化工有限公司)按照 2:1:1 质量比,配置矿化度为 1,3,5 g/L 的微咸水。

1.2 试验方法

试验中生物炭均匀混掺在土表下 0—20 cm,设置 3 个生物炭施用量(质量百分比):0(B_0),2%(B_2),4%(B_4);4 个水体矿化度:0 g/L(W_0),1 g/L(W_1),3 g/L(W_3),5 g/L(W_5),共 12 个处理,每个处理重复 3 次。

蒸发试验:土柱采用 5 mm 厚透明有机玻璃制成,内径 15 cm、外径 16 cm、高度 60 cm(土壤填装高度为 50 cm),底部设有透气孔,土柱外侧贴有 2 条刻度贴纸,便于准确分层装填土样。土壤容重为 1.35 g/cm³,每层 5 cm 分层装填,共计 10 层,层与层界面处打毛,避免试验过程中出现分层现象。蒸发试验前,采用马氏瓶恒压(2 cm)供水,供水量均为 4.4 L,入渗结束后吸干上层积水,用塑料膜封住土柱顶端避免无效蒸发,静置 48 h 后开始蒸发试验。蒸发装置见图 1。采用 275 W 灯泡提供热源,光源距土柱表层

土壤的距离均设置为 25 cm, 将静置结束的土柱放在同一高度的支撑面上, 并保证土柱底部孔隙的透气性, 同时使用与土柱等直径的圆柱测定光源的蒸发强度, 每天 18:00 称重并补充水源测量出光源的蒸发强度, 采用称量法测定土柱日蒸发量, 共监测 10 天(土柱质量基本恒定)。试验所处环境阴凉干燥, 蒸发试验期间室内停止通风, 每天 8:00 开灯, 18:00 关灯, 日蒸发历时 10 h, 10 天后逐渐接近稳定蒸发状态时停止试验, 平均日蒸发量为 1.49 mm。



注: 1 为穿线管; 2 为 275 W 红外灯; 3 为电源板; 4 为土柱; 5 为取样孔; 6 为混掺层; 7 为温度探头; 8 为电脑; 9 为 Agilent 数据采集仪; 10 为纯水蒸发。

图 1 蒸发装置示意

离心机试验: 采用(CR21G 型, 日立)测定, 将风干土样按 1.35 g/cm^3 的容重混掺生物炭后分层装填于 4 套环刀中, 并用不同矿化度水样(0, 1, 3, 5 g/L)浸泡 12 h 直至饱和, 水面高度低于环刀高度 1 mm, 之后取出静置一段时间后进行称量, 将环刀放入离心盒中, 在每次压力达到平衡后, 取出土样, 用电子天平立即称重, 随即放入离心装置进行下一个转速测量。试验中土壤水吸力值设定为 10, 50, 100, 300, 500, 700, 1 000, 3 000, 5 000, 7 000 cm。在进行土壤水分特征曲线测定时, 由于离心机高速旋转产生的离心力和内部土壤挤压力共同作用于试验土壤, 导致试验土壤容重发生改变, 呈现出较大的分布差异。因此, 在试验处理中必须考虑这种变化带来的差异性, 以降低容重变化对土壤水分特征曲线的误差。对此, 本研究采用修正公式^[13], 结合 Brooks-Corey 土壤水分特征曲线模型, 综合考虑土壤水吸力、容重变化等因素, 对土壤水分特征曲线进行修正。

$$\theta_m = \alpha \rho_b^{-m} h^{-n} \quad (1)$$

式中: θ_m 为质量含水率(g/g); ρ_b 为容重(g/cm^3); h 为吸力(kPa); α 、 m 、 n 为系数。

1.3 测定指标与方法

日蒸发量: 用电子秤(型号 HY—612, 精度 1 g)

称量土壤水分损失量, 日蒸发量按照公式(2)计算:

$$E_{\pm} = \frac{M_{\pm} \times 10}{\pi r^2} \quad (2)$$

式中: r 为土柱的半径(cm); $M_{\pm}$ 为前后 2 天称量土柱的差值, 即土柱的日质量变化值(g); $E_{\pm}$ 为土柱的日蒸发量(mm)。

土壤温度测定采用安捷伦数据采集仪(型号 34970 A)和热电阻温度传感器(型号 WZPT—035—GK—FY3PF, 精度 $0.01 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 温度传感器埋于土表以下 9, 18, 27, 36, 45 cm 处, 数据采集时间间隔为 1 min, 每天 8:00—18:00 持续采集 10 h。

土壤电导率(EC)采用土壤电导率仪(型号 ZD—EC, 精度 0.1 mS/cm)测定。

1.4 理论模型

Rose 蒸发模型:

$$E = M \times \sqrt{t_d} + N \times t_d \quad (3)$$

Gardner 蒸发模型:

$$E = M \times \sqrt{t_d} \quad (4)$$

Black 蒸发模型:

$$E = M \times \sqrt{t_d} + N \quad (5)$$

式中: E 为土壤的水分累积蒸发量(mm); M 为水分扩散参数; N 为稳定蒸发参数; t_d 为土壤水分蒸发天数(天)。

1.5 评价指标

本研究采用相对均方根误差(RRMSE)和纳什系数(NS)指标对模型的拟合效果进行评价。

$$\text{RRMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2 / \overline{M_i}} \quad (6)$$

$$\text{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \overline{M_i})^2} \quad (7)$$

式中: n 为样本数量(个); M_i 为实测值(mm); $\overline{M_i}$ 为实测平均值(mm); S_i 为模拟值(mm); $\overline{S_i}$ 为模拟平均值(mm)。

1.6 数据处理

试验结果均为 3 次重复试验测定的平均值, 采用 Excel 2016 软件进行数据处理, AutoCAD 2018 软件绘制装置示意图, Origin 8.0 软件进行绘图和模型的拟合, 显著性统计分析采用 SPSS 23.0 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤水分特征曲线及孔隙大小分布的影响

2.1.1 微咸水混掺生物炭对土壤水分特征曲线的影响 土壤水分特征曲线是土壤水分含量与土壤水吸力(基质势)的关系曲线, 反映土壤水能量与土壤体积含水率的函数关系, 是表示土壤基本水动力学特性的

重要指标。微咸水混掺生物炭对土壤体积含水率的影响见图 2,各处理下,土壤体积含水率呈现随着吸力增大逐渐变缓的趋势,且在数值上有一定区别。当土壤水吸力值等于 1 000 cm 时,各处理中 B_2W_0 处理下的土壤体积含水率最大,为 15.20%;同一矿化度

下,不同生物炭混掺量处理的土壤体积含水率大小为 $B_2>B_1>B_0$;同一生物炭混掺量下,不同矿化度微咸水处理的土壤体积含水率大小为 $W_0>W_3>W_5>W_1$ 。说明土壤体积含水率受微咸水矿化度和生物炭混掺量的共同影响。

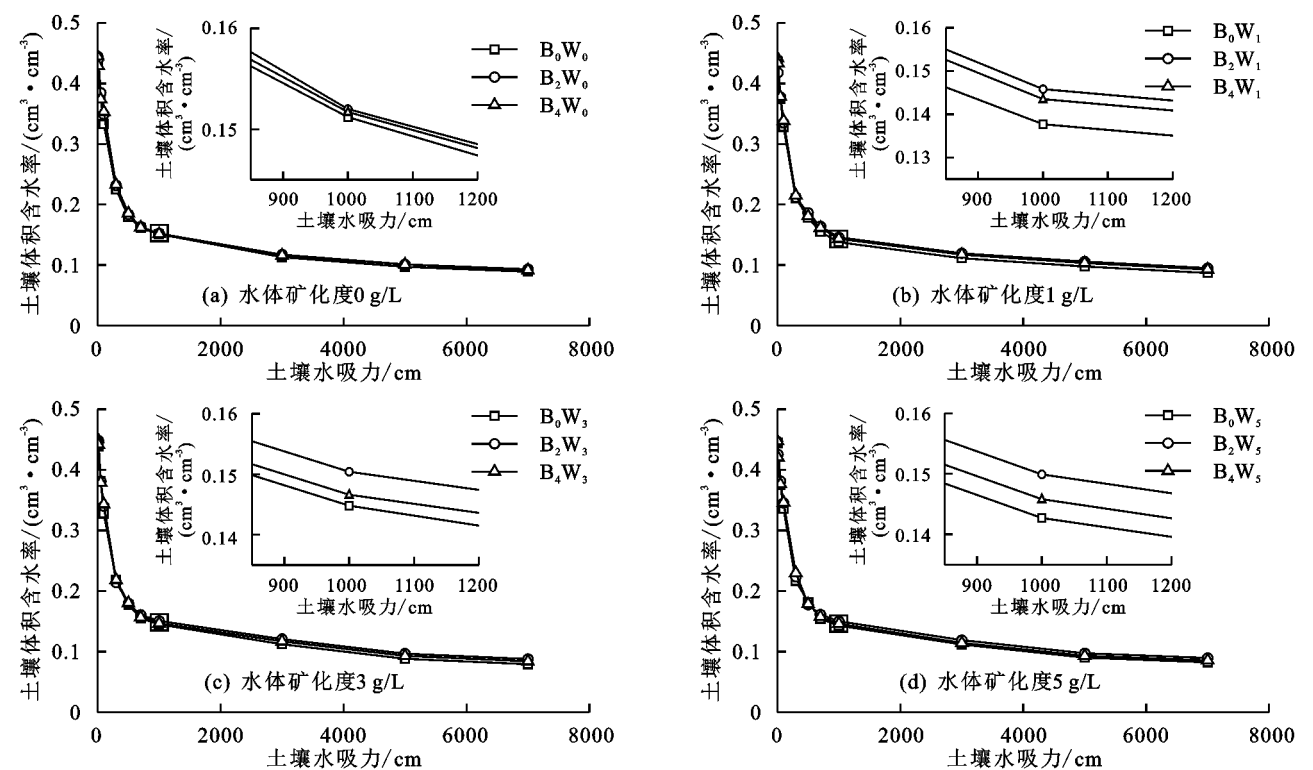


图 2 微咸水混掺生物炭对土壤体积含水率的影响

2.1.2 微咸水混掺生物炭对土壤孔隙大小占比的影响 土壤孔隙特征综合反映土壤孔隙数量、孔隙大小分布以及空间分布状况,决定土壤水分的供应和保持能力^[14]。土壤水分特征曲线可以间接反映土壤孔隙大小的分布,若将土壤孔隙设想为各种孔径的圆形毛管,那么土壤水吸力(s)和当量孔径(d)的关系可简单地表示为^[15]:

$$s=4\sigma/d$$
 (8)

$$d=300/s$$
 (9)

式中: s 为土壤水吸力(Pa); σ 为水的表面张力系数,室温条件下一般为 75×10^{-5} N/cm; d 为当量孔径(mm)。

根据公式(9)计算出当量孔径,可反映不同处理土壤中孔隙大小的分布。若土壤含水率 θ_1 对应的当量孔径为 d_1 ,含水率 θ_2 对应的当量孔径为 d_2 ,则土壤中孔径在 d_2 与 d_1 间的孔隙所占体积与孔隙总体积之比为 $\theta_1-\theta_2$ ($\theta_1>\theta_2$)^[15]。因此,可根据不同处理土壤孔隙大小的分布情况,分析不同处理土壤持水能力的变化。由本试验选取的吸力可知,与其对应的当量孔径 d 分别为 0.300 0,0.060 0,0.030 0,0.010 0,0.006 0,0.004 3,0.003 0,0.001 0,0.000 6,0.000 4 mm。不同处理土壤中的大、中、小孔隙所占比例见

表 1,处理 B_1W_0 、 B_2W_0 较 B_0W_0 处理土壤中的较大孔隙减少 9.57% 和 6.84%,较小孔隙增加 2.47% 和 5.30%,表明土壤施加生物炭减少土壤中的较大孔隙比例,增加土壤中的较小孔隙比例;处理 B_0W_1 、 B_0W_3 、 B_0W_5 较 B_0W_0 处理土壤中的较大孔隙增加 5.18%,11.91%,7.03%,较小孔隙减少 1.59%,1.15%,1.41%,表明微咸水的施加增加土壤中的较大孔隙的比例,减少土壤中的较小孔隙的比例;处理 B_2W_1 、 B_2W_3 、 B_2W_5 较 B_0W_0 处理的土壤中的较大孔隙增加 1.76%,0.68%,1.27%,较小孔隙增加 5.57%,6.45%,4.95%,表明生物炭和微咸水联合施用下增加土壤中的较大孔隙与较小孔隙比例。不同处理土壤中的大、中、小孔隙均具有统计学意义。

2.2 生物炭混掺量和微咸水对累积蒸发量的影响

土壤蒸发是农田水分损失的主要途径,有效抑制土壤的无效蒸发,对于提高农田水分有效利用率和抑制盐分表层积累具有重要意义。在微咸水入渗条件下,土壤累积蒸发量(E)随时间(d)的变化情况见图 3。从图 3 可以看出,随蒸发历时的推移,各处理的累积蒸发量随蒸发历时的延长呈上升趋势,日蒸发量逐渐减小。纯水蒸发下在第 2 天和对照组差异明显,微

咸水蒸发下在第 3~4 天和对照组差异明显;各处理蒸发过程可大致分为 3 个阶段^[15];初始 1~2 天为大气蒸发力控制阶段,平均累积蒸发量约为 21.49 mm;3~5 天为土壤导水率控制阶段,平均累积蒸发量约为 8.36 mm;6~10 天为水汽扩散控制阶段,平均累积蒸发量约为 2.08 mm。相同微咸水矿化度,不同生物炭混掺量处理的累积蒸发量均小于未混掺生物炭的处理,即 2% 处理 < 4% 处理 < 0 处理,说明生物炭对纯水和微咸水蒸发有一定抑制作用,且随着生物炭混掺量增大对水分蒸发抑制效果减弱;当生物炭混掺量为 0 时,不同矿化度微咸水累积蒸发量为 0 处理(94.98 mm) < 5 g/L 处理(96.36 mm) < 1 g/L 处理(96.54 mm) < 3 g/L 处理(99.36 mm);生物炭混掺量为 2% 和 4% 时,不同矿化度微咸水累积蒸发量为 0 处理 < 3 g/L 处理 < 5 g/L 处理 < 1 g/L 处理,3 g/L 处理的累积蒸发量最接近纯水。试验结果表明,混掺生物炭可以抑制微咸水蒸发,但微咸水中的盐分促进水分蒸发,生物炭和微咸

水中的盐分对蒸发均产生影响。

表 1 不同处理土壤中的大、中、小孔隙所占比例

单位: %

处理	较大孔隙 (>0.02 mm)	中等孔隙 (0.02~0.002 mm)	较小孔隙 (<0.002 mm)
B ₀ W ₀	10.24g	7.40c	11.32g
B ₂ W ₀	9.54h	7.96b	11.72d
B ₄ W ₀	9.26i	8.12a	11.60e
B ₀ W ₁	10.77c	7.28def	11.14h
B ₂ W ₁	10.42e	6.60g	11.95b
B ₄ W ₁	10.35f	7.16f	11.72d
B ₀ W ₃	11.46a	7.30cd	11.19h
B ₂ W ₃	10.31f	6.36h	12.05a
B ₄ W ₃	10.71d	7.17ef	11.47f
B ₀ W ₅	10.96b	7.37cd	11.16h
B ₂ W ₅	10.37ef	7.33cd	11.88c
B ₄ W ₅	10.34f	7.29cde	11.42f

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$) (Duncan 检验)。

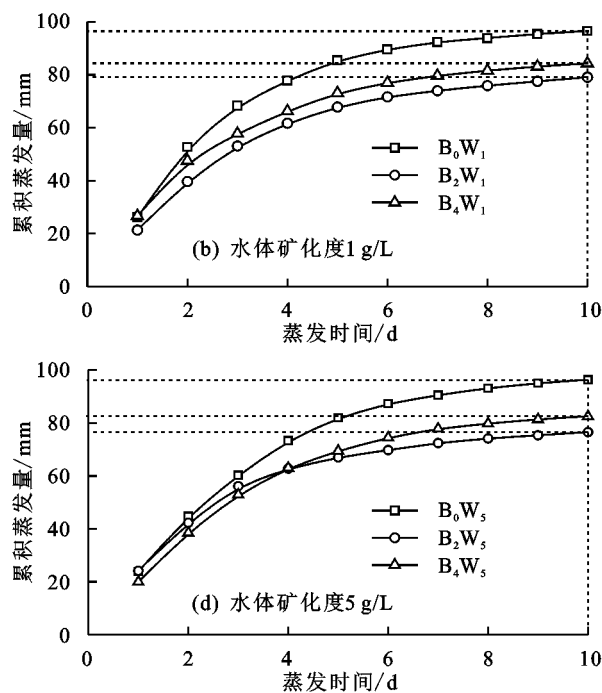
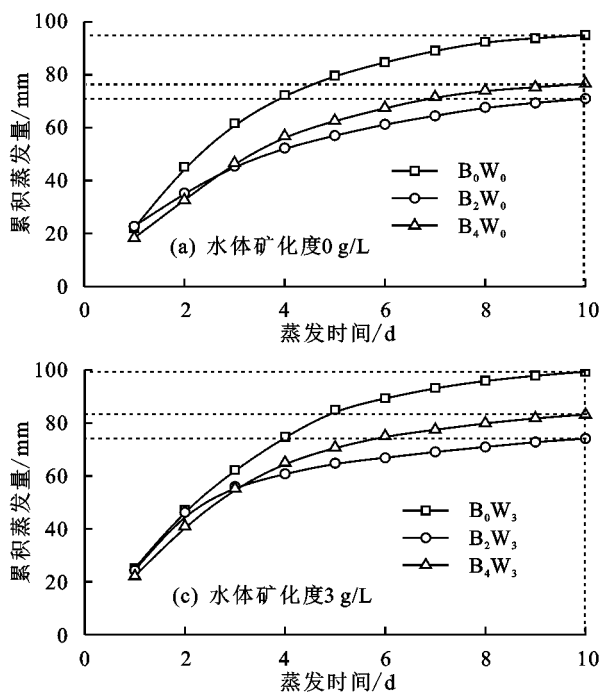


图 3 累积蒸发量与蒸发时间的关系

2.3 土壤蒸发模型模拟评估

为进一步研究不同生物炭混掺量对微咸水蒸发过程的影响,采用 Rose 模型、Gardner 模型、Black 模型对实测累积蒸发量进行拟合,并对参数拟合结果进行精度分析。不同蒸发模型拟合结果见表 2。

Rose 模型的 R^2 为 0.922 1~0.981 6,RRMSE 为 0.035 3~0.075 5,NS 为 0.930 8~0.983 6;Black 模型的 R^2 为 0.867 0~0.967 5,RRMSE 为 0.047 0~0.090 5,NS 为 0.881 7~0.971 1;Gardner 模型的 R^2 为 0.793 1~0.962 3,RRMSE 为 0.053 6~0.108 9,NS 为 0.793 1~0.962 3,其中 R^2 、NS 越接近于 1,RRMSE 越接近于

0,模型拟合效果越好。综合各项指标可以看出,3 种蒸发模型均能较好地模拟生物炭混掺条件下微咸水的蒸发过程,但 Rose 模型的 R^2 、RRMSE、NS 较 Gardner 模型和 Black 模型更加稳定,表明 Rose 模型拟合结果更优。

2.4 生物炭混掺量对盐分运移的影响

在微咸水蒸发条件下,不同生物炭混掺量的土壤电导率随土层深度的变化见图 4 和图 5。

从图 4 可以看出,入渗静置结束后,土壤盐分总体上呈现从上到下逐渐递增的趋势,在同一矿化度下,各处理 10—20 cm 土层初始含盐量均呈现出 $B_4 > B_2 > B_0$,

这可能是因为生物炭本身携带一部分盐分,且入渗结束初期生物炭对盐离子产生一定吸附。从图 5 可以看出,蒸发试验结束时,纯水入渗条件下,生物炭混掺量为 0、2%、4%时,土壤总电导率(EC)值相比于蒸发前降低 33.33%、28.26%、44.16%;矿化度为 1 g/L,生物炭混掺量 0、2%、4%下土壤总电导率相比于蒸发前降低 34.55%、27.54%、44.16%;矿化度为 3 g/L,生物炭混掺

量 0、2%、4%下土壤总电导率相比于蒸发前降低 38.54%、24.75%、36.79%;矿化度为 5 g/L,生物炭混掺量 0、2%、4%下土壤总电导率相比于蒸发前降低 40.37%、28.81%、33.33%。结果表明,生物炭混掺量为 2%时能够促使盐分在土层分布更均匀,对盐分在土壤表层累积产生一定的抑制作用,盐分含量越高,蒸发过程中向表层迁移的盐分越多。

表 2 不同蒸发模型拟合结果

处理	Rose 模型					Black 模型					Grander 模型			
	a	b	R^2	RRMSE	NS	a	b	R^2	RRMSE	NS	a	R^2	RRMSE	NS
B_0W_0	36.9587	-1.6156	0.9335	0.0755	0.9409	32.8569	-0.2182	0.9252	0.0801	0.9335	32.7678	0.9335	0.0801	0.9335
B_0W_1	44.7136	-4.0143	0.9221	0.0734	0.9308	30.5311	9.2269	0.8814	0.0905	0.8946	34.3004	0.8797	0.0967	0.8797
B_0W_3	38.8343	-1.7631	0.9398	0.0709	0.9465	34.0193	0.5909	0.9306	0.0761	0.9383	34.2607	0.9382	0.0762	0.9382
B_0W_5	37.3262	-1.5737	0.9353	0.0744	0.9425	33.3554	-0.2729	0.9276	0.0787	0.9357	33.2439	0.9357	0.0787	0.9356
B_2W_0	28.8426	-1.8070	0.9816	0.0353	0.9836	22.1388	4.9360	0.9675	0.0470	0.9711	24.1552	0.9623	0.0536	0.9623
B_2W_1	33.6971	-2.3871	0.9376	0.0680	0.9445	25.6687	4.4947	0.9137	0.0800	0.9233	27.5049	0.9182	0.0826	0.9182
B_2W_3	38.4766	-4.6458	0.9391	0.0557	0.9459	20.2673	15.0737	0.8670	0.0823	0.8817	26.4252	0.7931	0.1089	0.7931
B_2W_5	37.2671	-3.8716	0.9400	0.0598	0.9466	22.6659	11.1577	0.8872	0.0819	0.8997	27.2240	0.8601	0.0968	0.8601
B_4W_0	27.2042	-0.4593	0.9429	0.0728	0.9492	27.2770	-3.0947	0.9444	0.0719	0.9505	26.0128	0.9483	0.0735	0.9483
B_4W_1	39.2914	-3.6812	0.9563	0.0517	0.9612	25.4296	10.5570	0.9170	0.0713	0.9262	29.7422	0.8972	0.0841	0.8972
B_4W_3	33.8002	-2.0620	0.9357	0.0710	0.9428	27.3009	2.8162	0.9181	0.0802	0.9272	28.4514	0.9254	0.0812	0.9254
B_4W_5	32.1805	-1.4226	0.9339	0.0747	0.9417	28.5127	-0.0553	0.9253	0.0795	0.9339	28.4901	0.9336	0.0795	0.9339

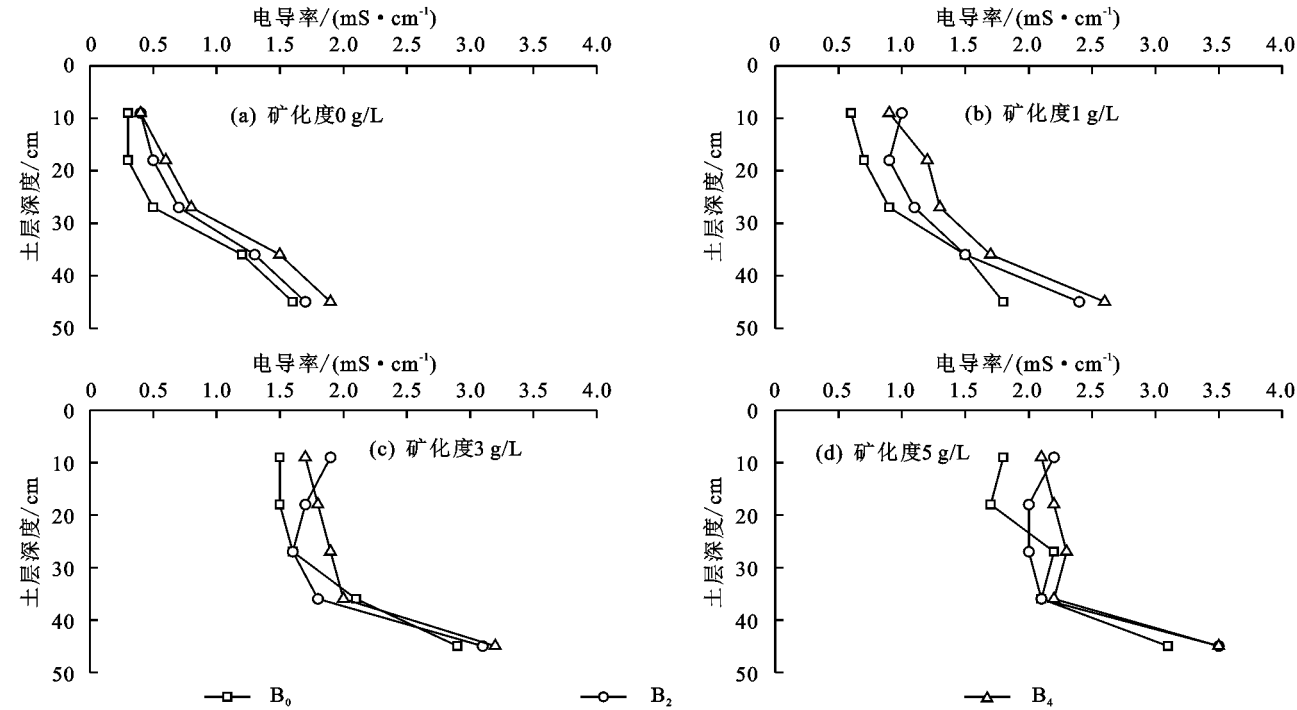


图 4 各处理不同土层蒸发初始 EC 值

2.5 生物炭混掺量对土壤温度的影响

土壤温度的高低可直接影响土壤蒸发量的大小,从而间接影响含水量的多少和植物的成活和生长,各土层初始温度值范围为 19.979~20.062 ℃。从图 6 可以看出,0—20 cm 土层,10 天内的温度波动比较明显,波动幅度较大,温度日变幅呈现出先增大后减小一致的规律;20—50 cm 土层,温度日变幅呈现

多个极值。随着蒸发历时延长,0、2%、4%生物炭混掺下的温度日变幅分别在第 7 天、第 4 天、第 5 天达到峰值。

相同微咸水矿化度下,不同处理各土层温度日变幅总体上均呈现出 2%处理<4%处理<0 处理,表明施用生物炭降低土壤温度,减小温度波动,且生物炭施用量为 2%时效果最优,但过量施用生物炭对

降低土壤日温度波动效果并不明显。相同生物炭混掺量下,0—10 cm 土层温度日变幅总体趋势为 0 处理 < 3 g/L 处理 < 5 g/L 处理 < 1 g/L 处理,其中 0 处理和 3 g/L 处理差异较小;10—50 cm 土层深度下的温度日变幅总体趋势为 0 处理 < 5 g/L 处理 < 1 g/L 处理 < 3 g/L 处理,以上规律表明,土壤初始温度一定

时,利用微咸水灌溉提高土壤平均温度。综上所述,利用 3 g/L 微咸水灌溉可以降低表土温度日变幅,提高 20—50 cm 土层土壤温度。以上结果对春秋时节,降低表土温度、提高土壤深处温度、将土温控制在一个恰当的范围、促进土壤保墒进而促进农业生产具有重要意义。

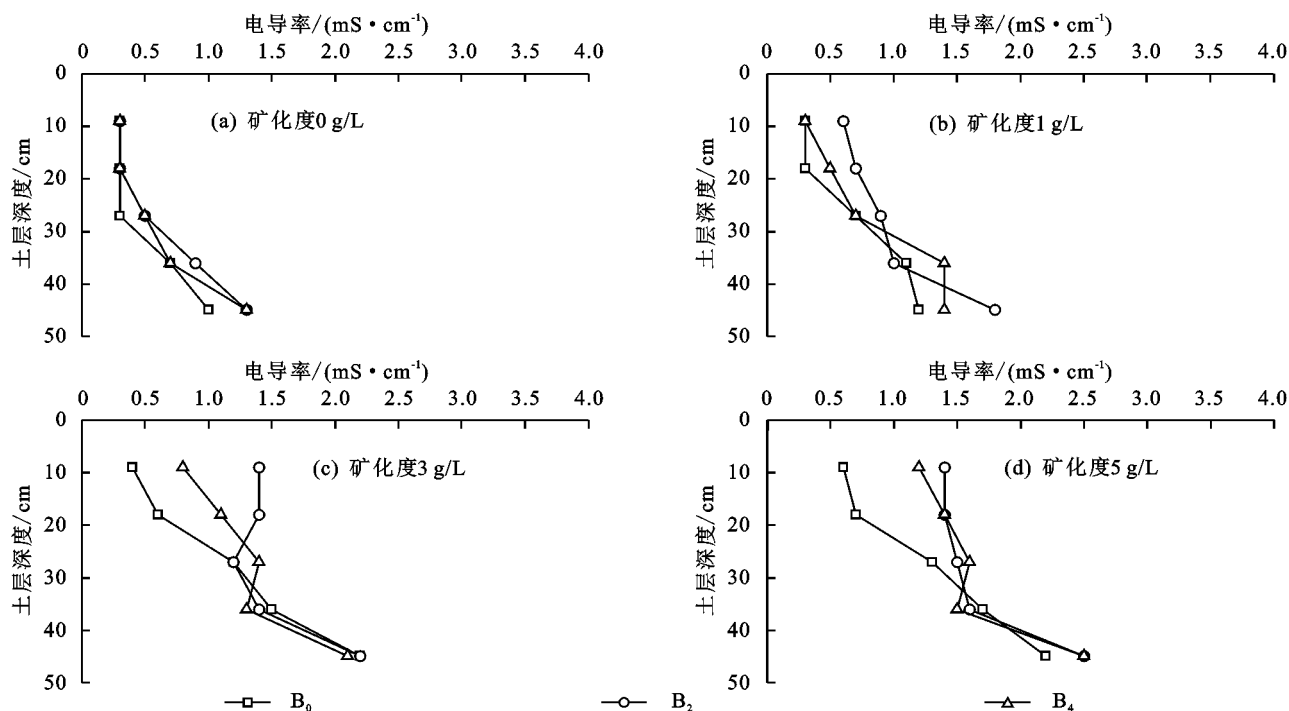


图 5 各处理不同土层蒸发结束 EC 值

3 讨论

3.1 土壤持水能力

土壤水分特征曲线可以间接反映土壤孔隙大小的分布,反映土壤持水性能。混掺生物炭能提高土壤总孔隙度和毛管孔隙度^[16],改变土壤大、中、小孔隙的分布比例,进而影响土壤持水性能。土壤中大孔隙比例越高,蒸发情况下土壤持水能力越弱,土壤小孔隙比例越高,土壤持水能力越强。张慧琦等^[17]研究表明,秸秆生物炭可以提高砂土持水能力,改善砂土持水孔隙分布,减少大孔隙分布,但当生物炭施用量 $\geq 2\%$ 才有显著效果。本研究表明,土壤混掺生物炭减少土壤中较大孔隙的分布,增加土壤中较小孔隙的分布,提高土壤的持水能力,减少蒸发量。初步分析主要是由于生物炭固体颗粒自身拥有较大的孔隙度,容易与土壤颗粒形成一定的微小团粒结构,增加土壤中的水稳性团聚体。同时,生物炭颗粒较小,填充土壤中较大孔隙,因此生物炭混掺对中、大孔隙比例的降低作用更为明显^[18]。但微咸水灌溉增加土壤中较大孔隙的比例,减少土壤中较小孔隙的比例,降低土壤的持水能力。初步分析可能是本试验采用的土壤中黏粒含量比例较高,而盐分离子对土壤中的黏粒有较为明显的膨胀作用,进而增大土壤的孔隙度^[19],并且随着水溶液中的

盐分在土壤不断积累,土壤中较大孔隙逐渐变小,中等孔隙演化为较小孔隙,较小孔隙比例增加,土壤持水能力增强,但是高矿化度水体使土壤孔隙度下降导致水分运动过程受阻,即随着微咸水矿化度的增加土壤持水能力先增大后减小,土壤孔隙比例随着微咸水矿化度,土壤持水性随之改变。

3.2 累积蒸发量

土壤水分蒸发是农田水分平衡的重要组成部分,是制约干旱半干旱地区生产力的重要影响因素,降低无效蒸发,提高土壤蓄水保墒能力,是实现农业可持续发展的重要内容。本文的研究结果表明生物炭对纯水和微咸水蒸发有一定抑制作用。这主要是由于生物炭具有丰富的孔隙、巨大的比表面积、吸附性强等特点,容易与土壤形成微团结构,并且生物炭颗粒细小,填充土壤中较大孔隙,进而产生一定的抑制作用。这一结果与李帅霖等^[11]施用生物炭对壤土入渗和蒸发影响的试验以及 Alkhasha 等^[20]混掺红枣生物炭对砂土蒸发影响的结果一致。同时,本研究发现,低矿化度的微咸水促进土壤水分蒸发,而高矿化度的微咸水抑制水分运移,这与邢旭光^[21]和 Mahdavi 等^[22]的研究结果存在一定差异。初步分析可能是微咸水矿化度较高时,盐分离子数量增加,

导致土壤孔隙减少,而微咸水矿化度较低时,盐离子数量少,在蒸发过程中土体中气体排出,加快土体收缩;随着蒸发历时增加,高矿化度微咸水的盐分逐渐向表层运移,在蒸发达到第 2 个阶段时,析出的盐

分在土壤表层形成盐层,同时土壤表层形成硬化层,且硬化层的厚度随着蒸发历时的延长而增加,堵塞土壤孔隙,增加水汽扩散的阻力,降低土壤在第 2,3 阶段下的日蒸发量。

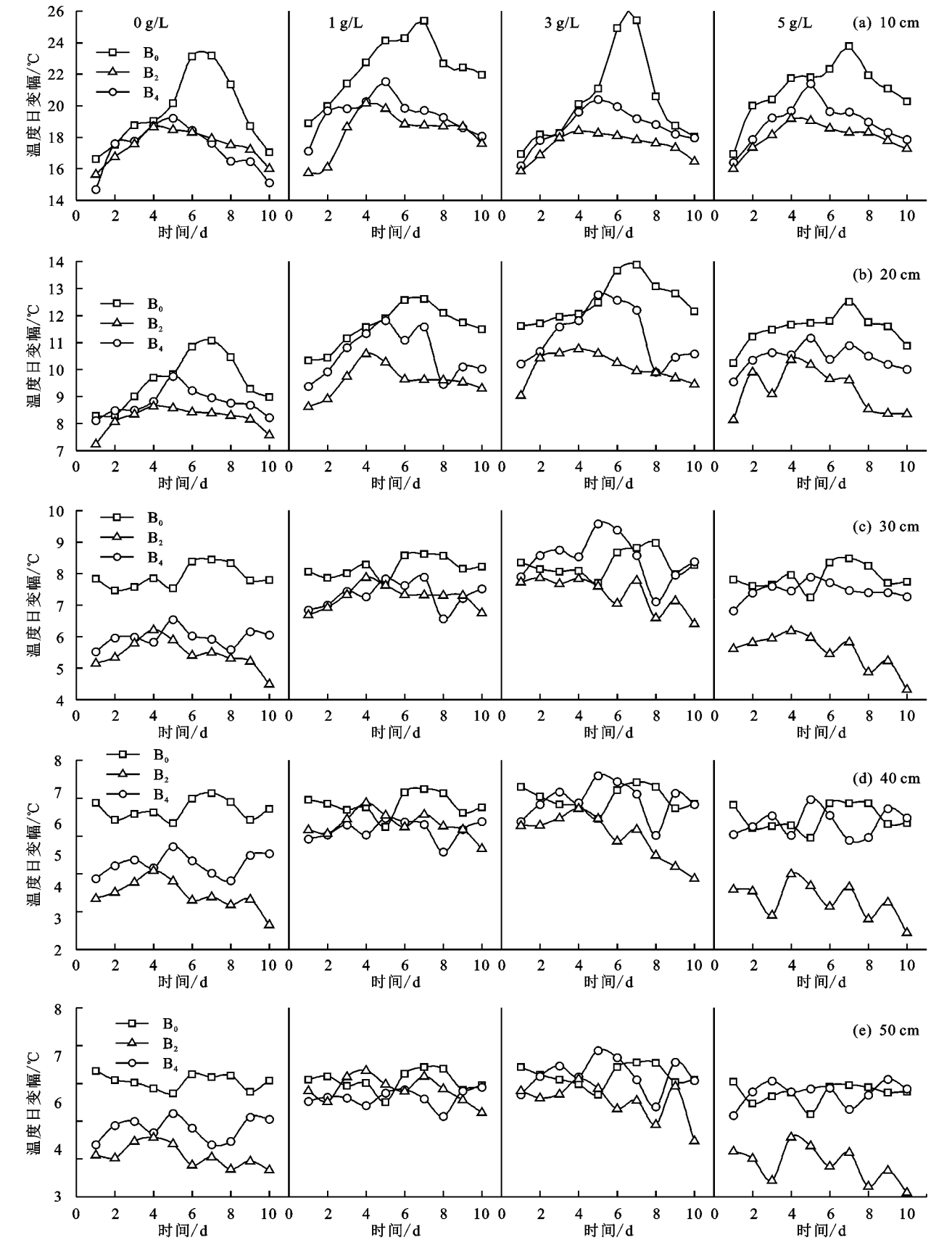


图 6 不同矿化度下各土层温度日变幅

3.3 土壤盐分分布

与淡水灌溉相比,微咸水灌溉除提供作物生长所必需的水分外,还将盐分代入土壤中。当土壤中的盐分达到一定程度后,强烈的蒸发促使盐分在上层土壤聚积,造成土壤表层积盐、盐渍化等问题,进而影响作物的正常生长。施加生物炭可以缓解微咸水灌溉条件下盐分表聚现象,对土壤有一定的降盐作用^[23],但生物炭添加量越大,其对土壤盐分的降低效果越弱。本研究中生物炭混掺量为 2% 时,土壤蒸发初始和结束前后总电导率降低幅度小,盐分均匀分布在各个土层中,抑制盐分表层运移,再一次证明生物炭的抑盐作用。分析原因可能是蒸发过程中,生物炭的微孔隙结构能够较好地迫使水分保持在毛细状态,加大水分蒸发散失难度,有效地抑制盐分沿土壤毛细管上升^[24],并且生物炭还有较强的阳离子互相交换能力,可以将盐溶液中的阳离子和土壤固相中的阳离子进行交换,进而降低土壤中盐分和钠离子含量。深层土壤水分和盐分向表层土壤运移,水去盐留,在生物炭对水分的吸持力及其改善土壤通透性 2 种机制相互作用下,导致盐分在土层中均匀分布。同时,土壤中盐分含量的高低也影响盐分向表层运移,含盐量越高蒸发过程中随水分向表层迁移的盐分越多^[25]。

3.4 土壤温度日变幅的影响

土壤温度是影响土壤水盐运动和土壤肥力的重要因子。施加生物炭降低土壤容重、热扩散率、热导率^[26]和 10—25 cm 土层的平均土壤温度^[10],这与本试验中获得的生物炭降低土壤平均温度的结果一致。本文中生物炭混掺层在 0—20 cm 土层,但 10—20 cm 土层的土壤温度受生物炭影响较小,这是由于土壤温度随土层深度变化的动态特性造成的,表层土壤的热量更容易散失或从大气中吸收,而深层土壤温度受大气温度的影响较小,处于相对稳定的状态。本研究结果中相同生物炭混掺量下,0—10 cm 土层深度的温度日变幅总体趋势为 0 处理 < 3 g/L 处理 < 5 g/L 处理 < 1 g/L 处理,可以发现,相比于纯水,微咸水提高土壤平均温度,且低矿化度微咸水更容易提升土壤温度,原因可能是微咸水中的盐分影响水体的比热容,盐水的比热容低于纯水,盐分含量越高,比热容越小^[27],而比热容越小,单位时间内升温越快,但低矿化度微咸水增加土壤孔隙,加速土壤内外热量交换,进而增加温度变化。生物炭可以有效降低土壤温度日变幅,土壤温度日变幅又与累积蒸发量呈正相关,原因可能是施加生物炭降低土壤容重,导

致土壤疏松多孔,由水汽的比例影响导热率,水多气少,土壤热容量大,导热率高,土温不易升降而趋于稳定;同时施加生物炭后导致表土温度日变幅减小,土壤导热率增高,传热速度变快,土壤水吸力减小^[28],进而导致土壤平均含水率增高,表土与底土温差小,整个土体温度比较均匀,进一步说明生物炭可以降低土壤温度波动;反之表土温度日变幅小,导致土壤平均含水率升高,但过量施加生物炭使土壤温度和累积蒸发量升高。

4 结论

(1)生物炭可以提高土壤对水分的吸持能力且 B_2W_0 处理下的土壤体积含水率最大,盐分降低土壤对水分的吸持能力,矿化度为 1 g/L 时土壤体积含水率最小;生物炭提高土壤较中小孔隙数量,盐分提高土壤中较大孔隙数量。

(2)微咸水矿化度一定时,混掺生物炭可以降低累积蒸发量,过量混掺生物炭促进蒸发,相比之下,2% 混掺量下,累积蒸发量最少;生物炭混掺量一定时,不同矿化度微咸水累积蒸发量呈现出 0 处理 < 3 g/L 处理 < 5 g/L 处理 < 1 g/L 处理,表明盐分含量过高或过低均促进蒸发;Rose 蒸发模型可以较好地拟合累积蒸发量和蒸发历时的关系。

(3)混掺生物炭在一定程度上使盐分均匀分布在土层中,抑制盐分表聚,当生物炭混掺量为 2% 时,土壤蒸发前后总电导率变化最小,表层积盐更少。

(4)相同矿化度微咸水下,施用生物炭降低土壤温度日变幅,2% 生物炭混掺效果优于 4%;同一生物炭施用量下,盐分提高土壤温度日变幅,0—20 cm 土层日变幅波动较大,20—50 cm 土层波动较小,其中矿化度为 3 g/L 时降低土壤表层温度,提高土壤深层温度;不同矿化度微咸水下的表土温度日变幅和累积蒸发量呈正比。

综合各项指标, B_2W_3 处理(生物炭混掺量 2%、微咸水矿化度 3 g/L)可以减少土壤水分蒸发,抑制土壤表层积盐,对土壤温度起到调控作用。

参考文献:

- [1] 毕玮,党小虎,马慧,等.“藏粮于地”视角下西北地区耕地适宜性及开发潜力评价[J].农业工程学报,2021,37(7):235-243.
- [2] 刘显.国际化绿色化背景下中国西北地区粮食安全研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [3] 郭全恩,王益权,南丽丽,等.不同溶质及矿化度对土壤溶液盐离子的影响[J].农业工程学报,2019,35(11):

- 105-111.
- [4] 王全九,单鱼洋.微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J].农业机械学报,2015,46(12):117-126.
- [5] 刘秀梅,王淦,王华田,等.磁化微咸水灌溉对土壤交换性盐基离子组成的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):266-271.
- [6] Katuwal K B, Xiao B, Jespersen D. Physiological responses and tolerance mechanisms of seashore paspalum and centipedegrass exposed to osmotic and iso-osmotic salt stresses[J]. Journal of Plant Physiology, 2020, 248: e153154.
- [7] Chan K Y, Van Zwieten L, Meszaros I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. Soil Research, 2008, 46(5): 437-444.
- [8] 魏永霞,王鹤,刘慧,等.生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J].农业机械学报,2019,50(9):290-299.
- [9] 孙泉沁,房凯,费远航,等.施加生物质炭对盐渍土壤结构和水力特性的影响[J].农业机械学报,2019,50(2):242-249.
- [10] 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.
- [11] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入参与蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):135-144.
- [12] 许健,牛文全,张明智,等.生物炭对土壤水分蒸发的影响[J].应用生态学报,2016,27(11):3505-3513.
- [13] 邵明安,吕殿青,付晓莉,等.土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间定量关系 I. 填装土壤[J].土壤学报,2007,44(6):1003-1009.
- [14] Chandrasekhar P, Kreiselmeier J, Schwen A, et al. Modeling the evolution of soil structural pore space in agricultural soils following tillage[J]. Geoderma, 2019, 353: 401-414.
- [15] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:18-24.
- [16] 郑健,向鹏,孙强,等.生物炭混掺对沼液间接地下滴灌土壤水力特性的影响[J].农业机械学报,2022,53(10):340-351,404.
- [17] 张慧琦,李子忠,秦艳.玉米秸秆生物炭用量对砂土孔隙和持水性的影响[J].生态环境学报,2022,31(6):1272-1277.
- [18] 赵迪,黄爽,黄介生.生物炭对粉黏壤土水力参数及胀缩性的影响[J].农业工程学报,2015,31(17):136-143.
- [19] 刘安琪.盐碱地“沙穴—微咸水滴灌”模式对土壤水盐分异规律影响与种植参数优化[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [20] Alkhasha A, Al-Omran A, Alghamdi A G. Effect of water quality and date palm biochar on evaporation and specific hydrological characteristics of sandy soil[J]. Agriculture, 2020, 10(7): e300.
- [21] 邢旭光.添加物与盐分对土壤持水与水分入渗—蒸发特性的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [22] Mahdavi S M, Fujimaki H. Soil salinity resistance effect on evaporation[J]. Eurasian Soil Science, 2019, 52(5): 526-534.
- [23] 李毅,冯浩,梁嘉平,等.土壤属性和作物生长对生物炭施用的响应和反馈研究进展[J].水土保持学报,2022,36(5):9-16.
- [24] 黄明逸,张展羽,翟亚明,等.咸淡交替灌溉下生物炭对滨海盐渍土及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2020,36(21):88-96.
- [25] Dong L, Xiong Y W, Huang Q Z, et al. Evaporation-induced salt crystallization and feedback on hydrological functions in porous media with different grain morphologies[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: e126427.
- [26] Ventura F, Salvatorelli F, Piana S, et al. The effects of biochar on the physical properties of bare soil[J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2012, 103(1): 5-11.
- [27] 张群慧.湖泊模型的发展及青藏高原湖泊热力过程数值模拟和预测[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [28] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:176-183.