doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.044

不同调控措施对冻融土壤渗透性与水盐再分布的影响

付　强[1,2]　李　旭[1]　李天霄[1,2]　侯仁杰[1,2]

(1.东北农业大学水利与土木工程学院,哈尔滨 150030;
2.东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室,哈尔滨 150030)

摘要:开展室内冻融循环试验,设置不同土壤初始含水率(15%、20%、25%)、不同含盐量(原始土壤、施加 0.2% $NaHCO_3$)、不同生物炭粒径(0~0.5 mm,S 处理;0.5~2 mm,L 处理)与未处理组(CK),分析冻融循环过程中不同调控措施下土壤孔隙结构变化对土壤渗透性与水盐再分布的影响,并定量表征土壤水盐运移过程。结果表明:冻融作用促使土壤孔隙扩张,骨料破碎,导致土壤饱和导水率(k_s)上升、冻土饱和导水率(k_{fs})下降。且土壤初始水盐含量提升均会增加冻融作用对土壤结构的破坏,增加土壤孔隙扩张幅度与冻融循环结束后 k_s 与 k_{fs} 变化幅度,并加剧冻融期土壤水盐上迁比例。施用生物炭可降低冻融期土壤孔隙扩张幅度并提高土壤团聚体稳定性。与 CK 相比,各含水率及各含盐量 S、L 处理分别使冻融后 k_s 平均降低 48.35%、37.69%,k_{fs} 下降幅度平均降低 55.44%、78.55%。同时,生物炭处理可降低表层土壤(10 cm 处)含水率与电导率上升幅度。土壤大孔隙占比与小孔隙占比分别为 k_s 和 k_{fs} 的关键驱动因子。本研究表明施加 0.5~2 mm 生物炭对冻融条件下土壤渗透性能及水盐再分布状况的调控效果最佳。研究结果可为冻融土壤水盐迁移理论研究体系提供理论依据和技术支撑。

关键词:冻融循环;生物炭粒径;土壤孔隙分布;土壤渗透性;水盐再分布

中图分类号:S156;S157　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)04-0471-12　　**OSID**:

Effects of Different Control Measures on Soil Permeability and Water – Salt Redistribution in Freeze-thaw Soil

FU Qiang[1,2]　LI Xu[1]　LI Tianxiao[1,2]　HOU Renjie[1,2]

(1. *School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin* 150030, *China*
2. *Key Laboratory for High Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Setting up an indoor freeze-thaw cycle experiment, with different initial soil water contents (15%, 20%, 25%), different salt contents (original soil, 0.2% $NaHCO_3$), different biochar particle sizes (0~0.5 mm, S treatment; 0.5~2 mm, L treatment) and the untreated group (CK). The effects of soil pore structure changes on soil permeability and water and salt redistribution under different regulatory measures during freeze-thaw cycle were analyzed. The results showed that freeze-thaw induced soil pore expansion, aggregate fragmentation, soil saturated water conductivity (k_s) increased, frozen soil saturated water conductivity (k_{fs}) decreased. In addition, the increase of initial soil water and salt content would increase the damage of soil structure by freeze-thaw action, increase the expansion of soil pores and the change amplitude of k_s and k_{fs} after the freeze-thaw cycle, and aggravate the proportion of soil water and salt upward migration during freeze-thaw period. The application of biochar can reduce the expansion of soil pores and improve the stability of soil aggregates during freeze-thaw period. Compared with CK, the k_s was decreased by 48.35% and 37.69% on average under S and L treatment, respectively, and the k_{fs} was decreased by 55.44% and 78.55% on average under S and L treatment, respectively. At the same time, biochar treatment can reduce the moisture content of the upper soil (10 cm) and increase electric conductivity value. The proportion of large pores and small pores in soil were the key driving factors of k_s and k_{fs}, respectively. It was showed that the application of 0.5~2 mm

收稿日期:2024-02-17　修回日期:2024-04-06

基金项目:国家自然科学基金区域联合基金项目(U20A20318)、国家自然科学基金面上项目(51279033、52279035)、国家杰出青年科学基金项目(51825901)和黑龙江省优秀青年科学基金项目(YQ2020E002、YQ2022E007)

作者简介:付强(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail:fuqiang0629@126.com

biochar had the best effect on soil permeability and water and salt redistribution under freeze-thaw conditions. The research results can provide theoretical basis and technical support for the theoretical research system of water and salt transport in freeze-thaw soil.

Key words: freeze-thaw cycle; biochar particle size; soil pore distribution; soil permeability; redistribution of water and salt

0 引言

我国 54% 的耕地土壤位于季节性冻土区[1],外界气温频繁波动引起的冻融循环是导致土壤结构状况破坏的主要因素[2],目前冻融循环作用已成为仅次于水力侵蚀与风力侵蚀的第三大生态环境危害[3]。以往研究显示,冻融期土壤活动层结构受冻融作用影响,土壤孔隙状况发生的变化改变了土壤渗透性[4],影响土壤的水分运动与溶质迁移[5],从而改变了作物根区水分养料的分布状态并增加了土壤盐渍化风险。土壤渗透性的改变也降低了融雪水的利用效率,导致融雪性灾害与土壤表面径流现象发生[6]。东北黑土区作为世界四大黑土区之一,其土壤养分充足,耕地资源丰富,但长期的冻融作用加剧了土壤内部有机质分解和水土流失,不利于作物根系生长发育与微生物日常活动[7]。同时,近年来全球极端天气高频发生,平均气温与降水量变化波动增大,使土壤结构变化更加复杂[8],维护寒旱区农田土壤生态环境的难度逐渐加大。因此,如何有效保持季节性冻土区活动层良好的土壤结构是改善寒区水土环境的重点研究内容。

生物炭作为一种高碳高有机质且易于制备的弱碱性修复材料[9],施入土壤中可改善土壤孔隙状况[10]、增强土壤持水能力[11]、减少土壤养分流失[12],从而调节植物生长环境。而将作物残留物制成炭粒还田也可缓解由焚烧秸秆造成的环境污染问题[13]。MARRIS[14]研究发现生物炭具有降低农田土壤碳排放量的作用后生物炭迅速成为相关领域研究热点,并开始作为土壤改良剂得到广泛应用。土壤饱和导水率是表征土壤水分入渗和再分布的重要指标,可体现水流在土壤中的运动能力[15]。施加生物炭可改善土壤导水性能,但其改良效果受多种因素影响。SUN 等[16]的试验结果表明,随着生物炭施加量增加,土壤饱和导水率增加。STREUBEL 等[17]向多种粉壤土中施加相同的生物炭,分别出现了持水能力显著升高、小幅下降和无影响的不同结果。但近年来有研究指出生物炭对土壤渗透性改良效果不仅受施加量与土壤质地的影响,生物炭粒径同样是决定其调控效果的重要因素[18]。EDEH 等[19]研究表明,生物炭与土壤颗粒之间相对粒径使得土壤孔隙分布状况出现了差别,从而影响了土壤导水性能。这与 LIU 等[20]的试验结果相似,施用粒径小于土壤颗粒粒径的生物炭会降低土壤渗透性,而施用粒径大于土壤颗粒粒径的生物炭则会增加土壤渗透性。生物炭粒径也会对土壤盐分运动产生影响,TANG 等[21]的试验结果表明,施用 0.5 ~ 2 mm 的中等粒径生物炭可缓解土壤盐化趋势并促进植物生长。所以在改良土壤过程中选择适宜粒径的生物炭成为保证季节性冻土区土壤稳定的渗透能力与良好水土环境的关键。

目前,关于生物炭在冻融循环条件下对土壤孔隙分布与土壤饱和导水率的潜在调控机制研究较少,对于冻融过程中不同含水率下土壤孔隙分布变化与冻土-非冻土导水能力之间的响应关系尚不清晰。因此,本研究立足于松嫩平原地区典型农田冻融土壤,通过室内模拟冻融试验,探究冻融循环与生物炭粒径的双重影响对土壤结构的作用机理,分析冻结与非冻结状态下土壤孔隙分布与渗透能力的响应机制,揭示影响土壤饱和导水率与冻结土壤饱和导水率的关键因子,以丰富和完善冻融土壤水盐迁移理论研究体系。

1 材料与方法

1.1 试验装置

采用的土壤来源于黑龙江省阿城综合试验基地(45°44′41″N, 126°45′32″E),该地区冬季降水量小且大气温度低,年积雪覆盖期约为 110 d,最大冻结深度约为 180 cm。由于气候的影响,该地区冻融循环现象明显,为典型的季节性冻土区域。土壤干容重为 1.35 g/cm^3,机械组成占比为:粘土 35.36%、粉末 40.32%、砂粒 24.32%,该类型土壤在松嫩平原分布广泛,具有区域代表性。试验所用生物炭采购于辽宁锦州生物炭制备厂,将所购生物炭进行过筛并将其分为小粒径生物炭(粒径为 0 ~ 0.5 mm)与大粒径生物炭(粒径在为 0.5 ~ 2 mm)备用。

在东北农业大学人工气候室进行室内土柱单向冻结试验,人工气候室通过顶部的温度监测控制系统及空气制冷压缩机(DD - 15 型,越冰制冷设备有限公司)自动调节温度,控温误差保证在 ± 0.1℃内。试验装置示意图如图 1 所示。土壤承载装置为

有底无盖的圆柱桶，高度为 40 cm，直径为 30 cm。采用土壤温湿度传感器（ZZWSY－FD2 型，锦州阳光气象科技有限公司）测定土壤含水率，装填土壤前在每个桶侧面 10、20、30 cm 处分别钻直径为 2 cm 孔以便安装传感器。传感器另一侧连接数据采集箱（PC－2SQ 型，锦州阳光气象科技有限公司），每 30 min 自动采集数据并保存。采用电导率仪测量土壤电导率，采用文献[22]方法计算土壤含盐量。土柱四周及底部包裹厚 3 cm 的 XPS 保温材料，以模拟实际环境中自上而下的单向冻结现象，并防止侧向冻胀的影响。

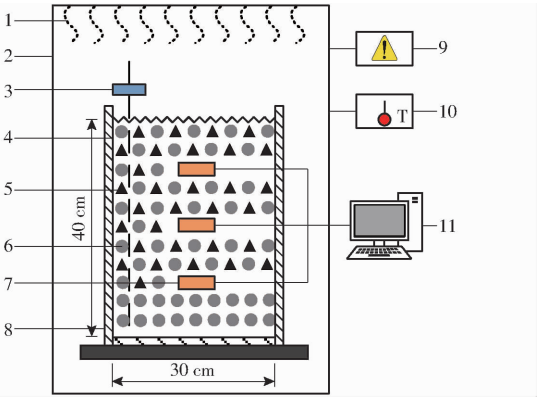

图 1　试验装置示意图

Fig. 1　Schematic of test device

1. 空调制冷压缩机　2. 人工气候室　3. 取土装置　4. PVC 圆柱桶　5. 生物炭颗粒　6. 土壤固体颗粒　7. 传感器　8. 保温材料　9. 故障报警系统　10. 温度控制系统　11. 数据采集系统

1.2　试验方法

将土壤晾晒于通风处自然风干后粉碎并过 2 mm 筛以去除土中碎石等杂质，作为不同粒径生物炭添加处理、不同含水率、不同含盐量的室内冻融循环对比试验的土壤样品。将过筛后土壤分别按照不同调控模式与去离子水、生物炭和 $NaHCO_3$ 拌合均匀。试验中，S 处理、L 处理与 CK 处理分别为施加质量分数为 2% 的小粒径生物炭、大粒径生物炭与未处理对照组，在上述不同生物炭粒径处理下设置 3 种不同含水率（分别为 15%、20%、25%（W1、W2、W3））与 2 种含盐量处理（分别为原始土壤（CK、S、L）和施加质量分数为 0.2% $NaHCO_3$（+CK、+S、+L）），共计 18 种处理。按照当地耕作习惯，该取样地翻地深度约为 30 cm，故装填土柱过程中上方 0～30 cm 处装填炭土混合物，下方 30～40 cm 处装填相同水盐添加量但未施加生物炭的正常土壤作为上层土壤的水分补充层。装填时对土壤进行分层装填，以相同力度充分压实，保证整个试验柱内土壤密度均匀统一，避免由土壤纵向初始状态差异导致的试验误差。同时，在桶内壁涂一层矿物油以避免冻融过程中出现边缘大孔隙流和边壁摩擦现象。将填装完成的土柱放置于人工气候室中 10℃养护 10 d，养护时在土柱上方包裹一层保鲜膜，防止土体内水分蒸发带来的试验误差。试验前取下保鲜膜，随后进行室内冻融试验。在 －20℃与 20℃分别对土壤进行冷冻 24 h 与解冻 24 h，即一个完整的冻融循环为 48 h，共经历 13 次冻融循环。冻融循环过程中，保证人工气候室内空气相对湿度（50%）。在 0、1、5、9、13 次冻融循环结束后进行土壤样品采集，并在取得土壤样品后 24 h 内进行相关指标测定。

1.3　指标测定方法

1.3.1　土壤孔隙分布状况

采用高速冷冻离心机（CR21G Ⅲ型，Hitachi 公司，日本）测定不同梯度基质吸力对应的含水率，根据毛细管模型理论，土壤吸力与孔隙直径的函数关系可表达为[23]

$$S=\frac{4\sigma}{d} \tag{1}$$

式中　S——土壤吸力，Pa

d——毛细管直径，mm

σ——液态水表面张力系数，室温（20 ℃）条件下为 7.5×10^{-4} N/cm

当土壤吸力 S 与毛细管直径 d 单位分别为 Pa 与 mm 时，则土壤吸力与毛细管直径的关系式可表示为 $d=300/S$，此时 d 为土壤当量孔径。与离心机不同梯度的基质吸力对应并结合本研究计算结果可将土壤当量孔径 d 分为小孔隙（$d\leqslant5$ μm）、中孔隙（5 μm $<d\leqslant$75 μm）、大孔隙（$d>75$ μm）3 段进行土壤孔隙结构组成分析。

1.3.2　团聚体稳定性

使用水稳性团聚体分析仪（DIK－2012 型，Daiki 公司，日本）测定土壤水稳性团聚体，将土壤团聚体分为大团聚体（粒径大于 2 mm）、中团聚体（0.5～2 mm）、小团聚体（0.25～0.5 mm）、微团聚体（0.106～0.25 mm）和粉黏粒部分（0～0.106 mm）5 种级别。采用平均重量加权直径（MWD）反映团聚体稳定性，MWD 计算式为[24]

$$MWD=\sum_{i=1}^{n}\overline{x}_iW_i \tag{2}$$

式中　$\overline{x}_i$——第 i 级筛平均孔径，mm

W_i——$\overline{x}_i$ 相应粒级团聚体占总量百分比，%

1.3.3　土壤饱和导水率

采用定水头法测定土壤饱和导水率，计算式为[25]

$$k_s=\frac{QL}{tA(h+L)} \tag{3}$$

式中 k_s——土壤饱和导水率,m/s

Q——土壤稳渗后总渗出量,L

L——土层厚度,m

t——渗透时间,h

A——土壤样品截面积,m^2

h——水层厚度,m

1.3.4 冻土饱和导水率

采用定水头法测定冻结土壤饱和导水率(k_{fs})。使用冰点为 -14℃的体积分数 30% 乙二醇水溶液为渗透液体,以避免使用液态水入渗改变土壤孔隙冻结状态变化。将饱和土壤样品与乙二醇水溶液置于人工气候室内,测量前将土壤样品在各测量温度下静置 2 h,以保证土壤样品整体温度相同,避免由土壤内部温度分布不均导致的试验误差。由预试验可知 -0.5 ~0℃区间内 k_{fs}变化趋势明显,之后趋于平稳,故本试验以 -0.1、-0.3、-0.5、-1、-3、-5℃ 共 6 个温度下的的 k_{fs}来分析冻土渗透性的变化规律。试验开始后 1 h 土壤样品进入稳渗状态,此后取 1 h 内渗出液平均值为总渗出量,采用式(3)计算 k_{fs}。

1.4 数据分析

所有数据均采用 Excel 记录并整理,采用 SPSS 26.0、Origin 2021 和 Microsoft Visio 进行数据处理与绘图。通过单因素方差分析(ANOVA)检验不同处理之间的差异,并用最小显著性差异法(LSD)检验不同处理之间的显著差异,显著性水平设为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同调控措施对土壤结构状况的影响

2.1.1 不同调控措施对土壤孔隙分布的影响

如图 2 所示,冻融循环过程中,小孔隙占比逐渐下降,大孔隙、中孔隙占比上升。以 W2 处理为例,13 次冻融后 CK 处理土壤小孔隙、中孔隙、大孔隙分别变化 -15.90%、8.68%、101.64%,即小孔隙主要向大孔隙发生转变。S、L 处理土壤小孔隙、中孔隙、大孔隙分别变化 -14.23%、17.37%、34.22% 和 -10.67%、9.52%、31.84%,施用生物炭减少了土壤小孔隙的变化幅度,并降低了向大孔隙转化比例,使冻融后土壤大、小孔隙占比的变化放缓。随着含水率与盐含量的升高,冻融作用对土壤大孔隙、小孔隙占比的影响加强,W1、W2、W3 土壤中 13 次冻融后 CK 处理土壤小孔隙占比分别降低 12.11%、15.09%、17.41%,大孔隙占比分别增加 47.23%、55.30%、62.76%,相较于未加盐处理,加盐处理土壤大孔隙、小孔隙占比分别平均增加 13.96%、7.92%。向高盐干旱土壤中施加生物炭对土壤孔径增长的抑制作用更明显,表现为中孔隙增长率提高,大孔隙增长率下降,土壤孔隙分布更为平均,W1 处理中 +S、+L 处理的大孔隙增长率与 +CK 处理相比分别下降 51.49%、59.08%,中孔隙增长率分别提高 192.47%、158.90%。综上所述,生物炭可使土壤孔隙分布更加均匀,且大粒径生物炭效果更佳。

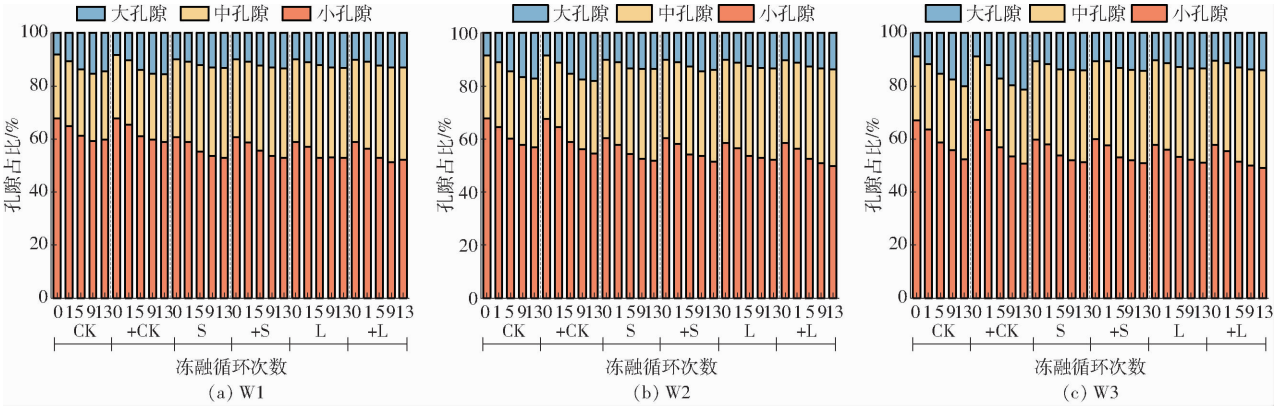

图 2 不同调控措施下土壤孔隙分布变化特征

Fig. 2 Change characteristics of soil pore distribution under different control measures

2.1.2 不同调控措施对土壤团聚体的影响

MWD 可反映土壤团聚体稳定性[26]。由图 3 可知含水率以及含盐量差别均未使冻融前的土壤 MWD 产生明显区别。而对于不同含水率及含盐量处理的土壤,与 CK 处理相比,初始状态下 S、L 处理 MWD 分别平均上升 16.37%、14.78%。冻融循环过程中,各处理 MWD 呈下降趋势,以 W2 处理为例,冻融结束后 CK、S、L 处理 MWD 分别降低 26.22%、20.70%、15.20%。且首次冻融对 MWD 影响最严重,约占总下降幅度的 1/5,之后 MWD 下降幅度逐渐减缓。由图 3a、3c 可看出,过高的含水率与含盐量加剧了冻融作用对土壤结构的破坏程度,图 3b 说明 W2 处理中生物炭减小土壤 MWD 下降幅度的能力优于 W1 处理和 W3 处理。上述结果说明施加生物炭可提高土壤结构稳定性,其中 L 处理表现略优于 S 处理。

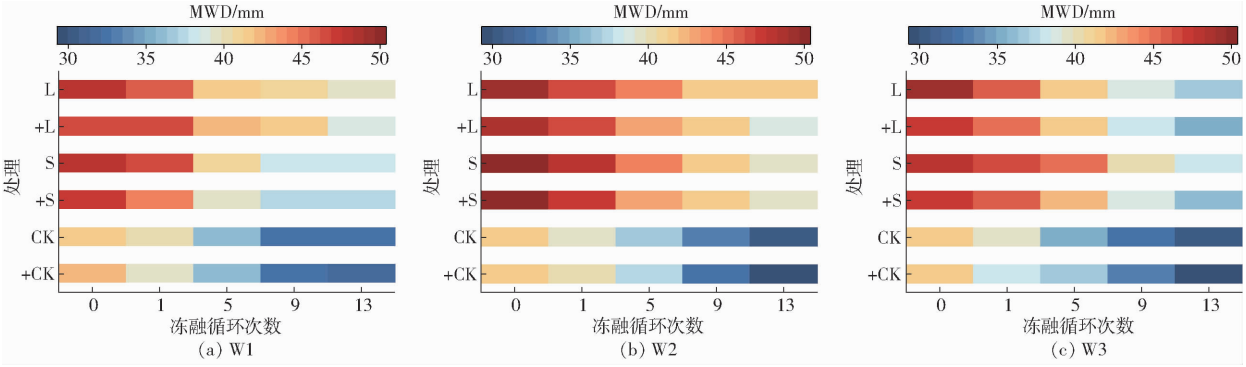

图 3　土壤团聚体变化特征

Fig. 3　Change characteristics of soil aggregates

2.2　不同调控措施对土壤渗透能力的影响

2.2.1　不同调控措施对土壤饱和导水率的影响

图 4 为不同调控措施的土壤在冻融循环前后土壤饱和导水率的变化情况，图中不同小写字母表示处理间差异显著（$p<0.05$），CK－15 表示含水率为 15% 的 CK 处理，以此类推。初始状态下，土壤饱和导水率受含水率与含盐量的影响明显，土壤水盐含量的升高均会增加土壤饱和导水率。施入生物炭可降低饱和土壤的导水能力，S 处理与 L 处理相较于 CK 处理使土壤初始饱和导水率分别平均下降 2.11%、14.29%。对比图 4a、4b 发现，冻融循环结束后，较高含水率会使土壤饱和导水率上升幅度更明显，W1、W2、W3 这 3 种含水率中 CK 处理冻融前后分别提升 6.66%、7.48%、8.66%，+CK 处理土壤饱和导水率均高于同含水率下的 CK 处理，说明含盐量增加也会进一步提升冻融后土壤渗透能力。生物炭调控的土壤饱和导水率在冻融期间的变化幅度有所降低，对比 CK 处理，各含水率土壤中 S 处理与 L 处理上升幅度分别平均降低 48.35%、37.69%，同样，+S 处理与 +L 处理上升幅度也明显低于 +CK 处理，且在含水率越高的土壤中，生物炭调控作用越明显。

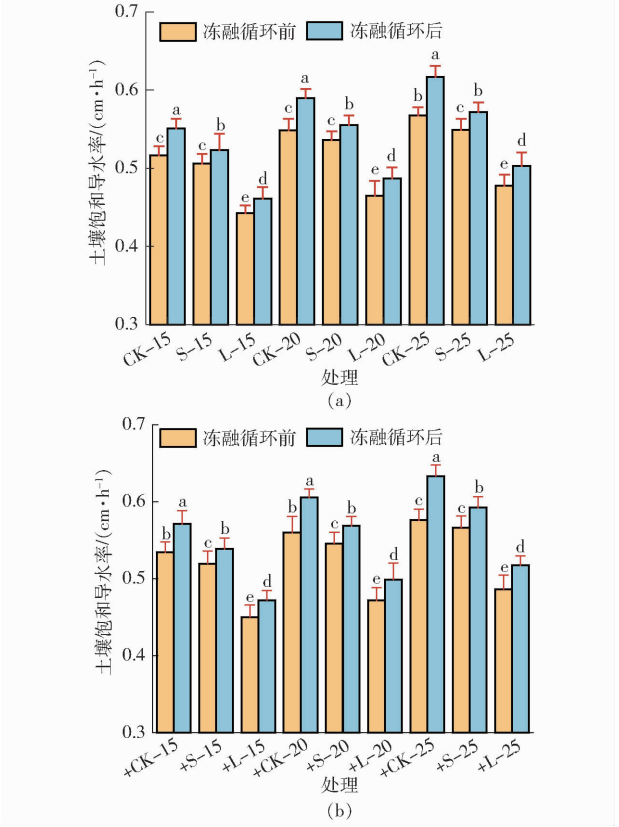

图 4　土壤饱和导水率变化特征

Fig. 4　Variation characteristics of soil saturated hydraulic conductivity

2.2.2　不同调控措施对冻土饱和导水率的影响

不同调控措施下 k_{fs} 变化趋势如图 5 所示（图中实线、虚线分别为冻融前、后 k_{fs} 变化曲线）。各调控措施下 k_{fs} 变化趋势相似，且均在 －0.5～0℃ 内发生明显下降，其下降值占总下降值的比例平均超过 96%，－0.5℃ 后虽继续呈现下降趋势，但幅度平稳且未在数量级上发生变化，且各处理土壤 k_{fs} 主要在 －0.1℃ 时差别较大，当温度继续下降时，k_{fs} 虽有不同，但其他温度下各处理间 k_{fs} 差距远小于 －0.1℃ 时各处理间差距，且 －0.3℃ 及以下温度的 k_{fs} 远小于 －0.1℃ 时 k_{fs}，即不同调控模式下冻土渗透性差别主要体现为 －0.1℃ 时的 k_{fs}。由此可见，－0.1℃ 时的 k_{fs} 可反映冻土渗透能力。冻融循环前，含水率与含盐量差别几乎未对 k_{fs} 产生影响，未施加生物炭处理 k_{fs} 均在 5×10^{-7}～6×10^{-7} m/s 之间。冻融循环后，各含水率中 CK 处理 k_{fs} 分别降低 38.27%、35.00%、42.50%，W2 处理 k_{fs} 下降幅度最低。除 W1 中 CK 处理外，其余高盐土壤在冻融期 k_{fs} 下降幅度大于未加盐处理土壤，在 －0.1℃ 时高盐条件下各处理土壤 k_{fs} 下降幅度较未加盐处理平均增加约 7%，即过高的含盐量和含水率会使土壤渗透能力下降。

施加生物炭可显著提高冻融循环前土壤 k_{fs}，与 CK 相比，冻融前 S、L 处理分别使 －0.1℃ 的 k_{fs} 上升 26.22%、32.89%，说明向土壤中施加适量小

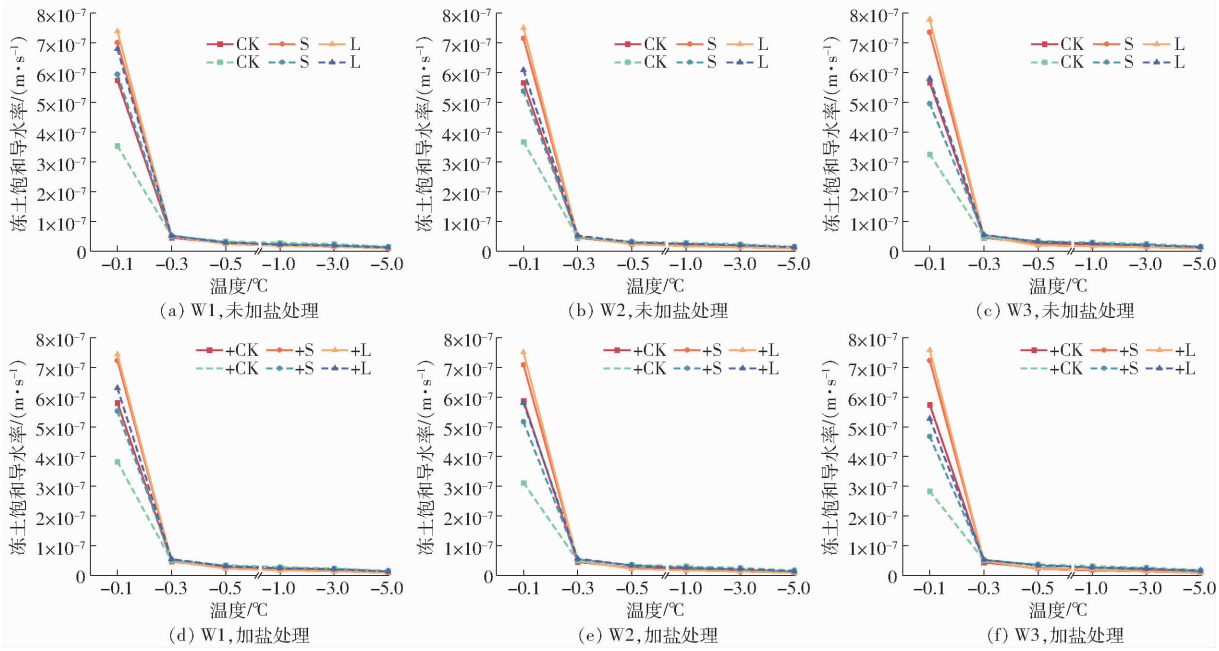

图 5 冻土饱和导水率变化曲线

Fig. 5 Change curves of measured saturated water conductivity of frozen soil

粒径生物炭可使土壤的导水能力提升约 1/4,适量大粒径生物炭可使土壤导水能力提升约 1/3。冻融后 S、L 处理对比 CK 处理分别使土壤 k_{fs} 上升 55.44%、78.55%,即/生物炭可明显降低因冻融作用导致的土壤导水率降幅,且大粒径生物炭效果更突出。对比图 5 中各含盐量处理可发现,含盐量的增加会使生物炭对冻结土壤导水能力的调控力有所变化,但大粒径生物炭的调控效果仍优于小粒径生物炭。

2.2.3 不同调控措施下土壤大孔隙占比与土壤饱和导水率的响应关系

图 6 为冻融循环试验过程中土壤大孔隙占比与土壤饱和导水率的响应函数关系图(图中阴影部分为处理的 95% 置信区间),两者响应关系较为明显。生物炭调控下的响应函数斜率均大于 CK 处理和 +CK 处理,即生物炭在土壤大孔隙占比涨幅相同条件下可增加土壤饱和导水率上升值,从而提升了土壤大孔隙占比对土壤饱和导水率的影响程度。这是因为生物炭可在冻融过程中维持土壤骨料稳定性,并降低土壤内部孔隙变形扩张,从而为水分运动提供稳定通道。未施加生物炭土壤易在冻融过程中发生团聚体破碎、土壤孔隙变形,使土壤孔隙弯曲度增加、孔隙连通性降低,从而对土壤水分运动产生负面影响,导致 CK 处理和 +CK 处理土壤大孔隙占比对土壤饱和导水率间的影响程度低于生物炭处理。图 6 中 S、L 处理和 +S、+L 处理响应函数曲线均位于 CK、+CK 处理的曲线下方,且生物炭处理土壤函数曲线纵轴变化区间均小于未施加生物炭处理,即

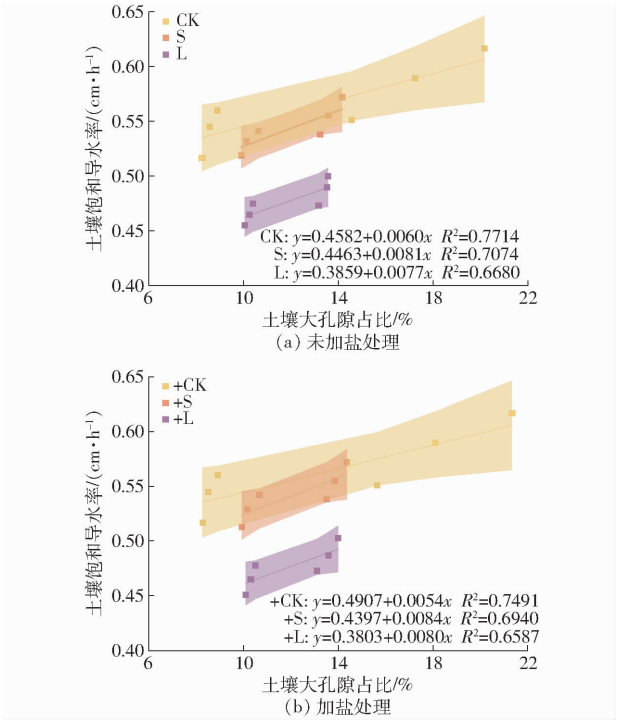

图 6 土壤大孔隙占比与饱和导水率响应关系

Fig. 6 Responses of soil macropore ratio to saturated water conductivity

生物炭可降低冻融循环过程中的土壤饱和导水率,并缩小冻融过程中土壤饱和导水率变化幅度,这表明施加生物炭可明显调控土壤饱和导水率。试验过程中 L 处理土壤饱和导水率的变化范围最小,说明大粒径生物炭更能稳定土壤渗透性。

2.2.4 不同调控措施下土壤小孔隙占比与冻土饱和导水率的响应关系

采用线性方程对土壤小孔隙占比与 k_{fs} 的响应

关系进行拟合，当温度过低时，会导致测量 k_{fs} 时乙二醇水溶液渗出量较少，这导致试验误差增大。为保证结果准确性，选取 -0.1℃ 与 -0.3℃ 两种温度下对土壤小孔隙占比与 k_{fs} 的响应关系进行分析，结果如图 7 所示。在 -0.1℃ 时，土壤小孔隙占比与 k_{fs} 呈正相关趋势，而在 -0.3℃ 时，呈负相关趋势。由各处理拟合函数决定系数 R^2 可知，含盐量增加对 k_{fs} 与小孔隙占比间的相关性并无明确影响，但施加小粒径生物炭可在一定程度上增强两者间相关性。-0.3℃ 时未施加生物炭处理拟合函数 R^2 均低于 -0.1℃ 时的拟合函数 R^2，说明 k_{fs} 与小孔隙占比间的相关性随着温度降低而降低。分析发现，土壤小孔隙占比对 k_{fs} 影响较大。温度下降时土壤大孔隙中的水分先冻结[27]，水流运动受阻明显，此时剩余可供水分运动的未冻结孔隙管道总体积下降，这会导致冻融过程中土壤 k_{fs} 大幅度下跌，此时土壤渗透能力主要由剩余小孔隙总体积决定。因此，小孔隙占比越低，意味着温度下降时，留存的未冻结孔隙总体积越小，则土壤冻结状态时的渗透性越低，这与 LEI 等[28]的研究结果一致。冻融过程导致 CK 处理小孔隙下降比例较大，而施加生物炭可在一定程度上稳定孔隙分布状况，使得 S 处理与 L 处理的 k_{fs} 下降幅度小于 CK 处理，这进一步证明了土壤小孔隙占比与 k_{fs} 间的相关性。

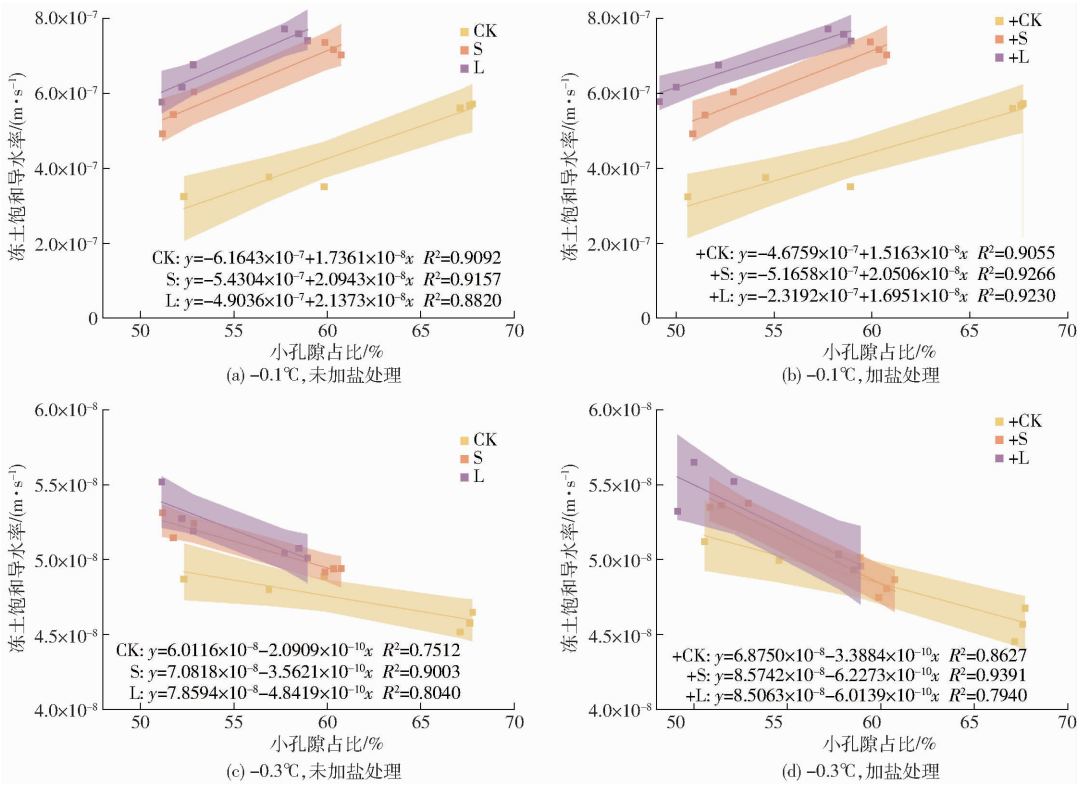

图 7　各温度下土壤小孔隙占比与冻土饱和导水率响应关系

Fig. 7　Responses of soil micropore proportion and frozen soil saturated water conductivity at different temperatures

2.3　不同调控措施对土壤水盐迁移状况的影响

2.3.1　不同调控措施对土壤水盐再分布的影响

图 8 为冻融循环过程中不同调控措施下各层土壤水盐含量变化特征，为研究方便将土壤分成 0 ~ 10 cm（土壤层数 1）、10 ~ 20 cm（土壤层数 2）、20 ~ 30 cm（土壤层数 3），图中 0 - 1 表示冻融次数为 0，土壤层数为 1，以此类推。由图 8 可知，土样静止养护时，各处理的上层土体水分缓慢向下层运动。冻融循环过程中，各处理土壤中间层水分率先向上运动，之后底层土壤水分向上迁移补充以降低土壤纵向的基质势能差值。对比图 8a、8c、8e 可发现，W1、W3 处理土壤冻融循环结束后中间层与底层土壤含水率接近，但 W2 处理的底层含水率高于中间层，这是因为 W1 处理中土壤含水率过低，仅依靠中间层土壤向上补充水分难以平衡势能差，此时底层水分会不断向上层土壤移动，而 W3 处理中土壤水分含量过多，底层部分水分受重力势能影响向下汇入地下水，最终出现中间层与底层土壤含水率接近的结果，由于 W2 处理的土壤含水率适宜，且土壤自身的保水能力可抵消重力势能造成的水分下沉。W1、W2、W3 处理条件下表层土壤含水率分别平均上升 5.58%、6.34%、7.55%，即土壤初始含水率的降低并没有明显降低液态水上迁移量。此外，加盐处理水分向上迁移量均高于未加盐处理，即土壤含盐量

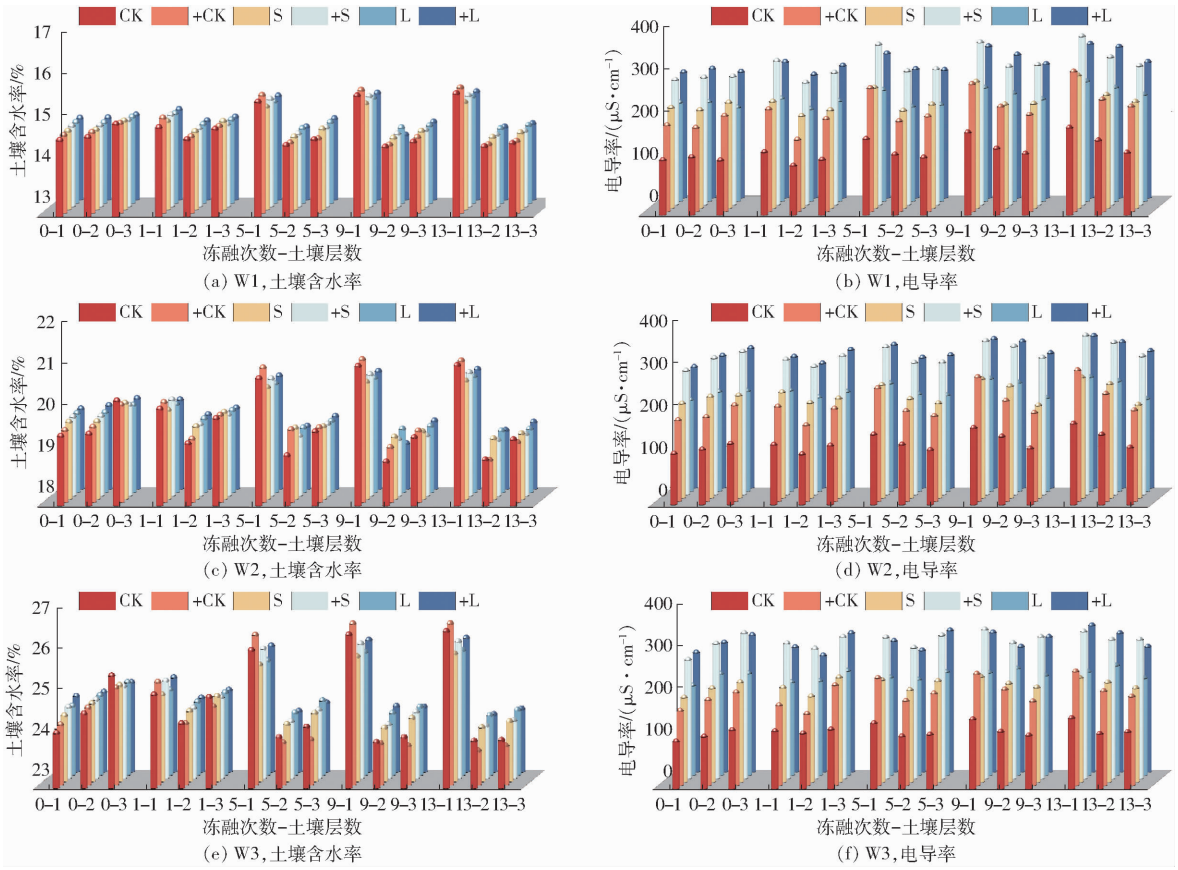

图 8 各层土壤含水率与电导率(EC)变化特征

Fig. 8 Variation characteristics of soil moisture content and electrical conductivity(EC) value in each layer

与土壤水向上迁移量成正比。冻融循环后 W2 处理土壤中,CK、S、L 处理表层土壤含水率分别上升 8.74%、5.04%、4.47%,即施加生物炭可大幅降低水分向上迁移总量。

土壤中盐分随冻融循环的进行逐渐在表层土壤累积,以 W1 处理为例,CK、+CK 处理在冻融循环结束后表层土壤电导率分别上升 59.12%、61.84%,其中首次冻融后表层土壤上升的电导率约占总上升值的 28%。对比图 8b、8d、8f 可以看出,含水率升高及含盐量降低均可减少表层土壤 EC。W2 条件下 CK、S、L 处理表层电导率平均增加 33.76%、28.20%、24.28%,即施加生物炭会减少土柱内向上的盐迁移量,使各层土壤含盐量分布更加均匀。5 次冻融之后,W1 处理土壤发生底部补充层水分携带盐分向上移动现象,这导致底层土壤 EC 平均增加 7.82%。同时,W3 处理土壤中,由于水分下沉明显,30 cm 处土壤内盐分向下运移到补充层(30 ~ 40 cm),使得 30 cm 处土壤 EC 稍有降低。综上所述,施加生物炭可对土壤水分及盐分起到一定的固持效果,大粒径生物炭表现更佳。

2.3.2 不同调控措施下土壤水盐含量的响应关系

不同调控措施下表层(10 cm 处)土壤含水率与含盐量的响应关系如图 9 所示,各调控措施下土壤含盐量均与含水率呈正相关。3 种含水率的土壤水盐关系式斜率由大到小依次为 W1、W2、W3,这说明土壤在冻结过程中水分携带可溶性盐分向上迁移,但在融化过程中,高含水率土壤会携带盐分向下回迁,并不会在土壤表层发生过多的盐分聚集现象,而含水率较低土壤斜率均大于 1,即土壤含盐量增长趋势大于含水率,这意味着每次冻融循环结束,均会有溶质残留在土壤表面。此外,W3 处理土壤中表层水盐含量关系曲线中的最终含盐量相对 W1 处理土壤也稍有降低,且含盐量较高的土壤其水盐响应关系式斜率均大于同样处理的低盐处理土壤,说明原本已出现盐渍化趋势的土壤盐分累积现象更加严重,需要土壤改良剂进行及时调控。

生物炭加入使土壤电导率升高,这会使计算得出的土壤含盐量升高,但并不意味着土壤已经出现盐渍化。由图 9 可以看出,在生物炭调控下,不同水盐含量土壤的水盐响应关系式斜率(即变化幅度)基本相同,说明土壤含水率与含盐量变化并不影响生物炭持续防治土壤盐渍化的效果。S 处理曲线斜率略微大于 L 处理,这是由于部分小粒径生物炭随土壤水迁移所导致,建议使用大粒径生物炭对高盐干旱土壤进行盐碱化防治。

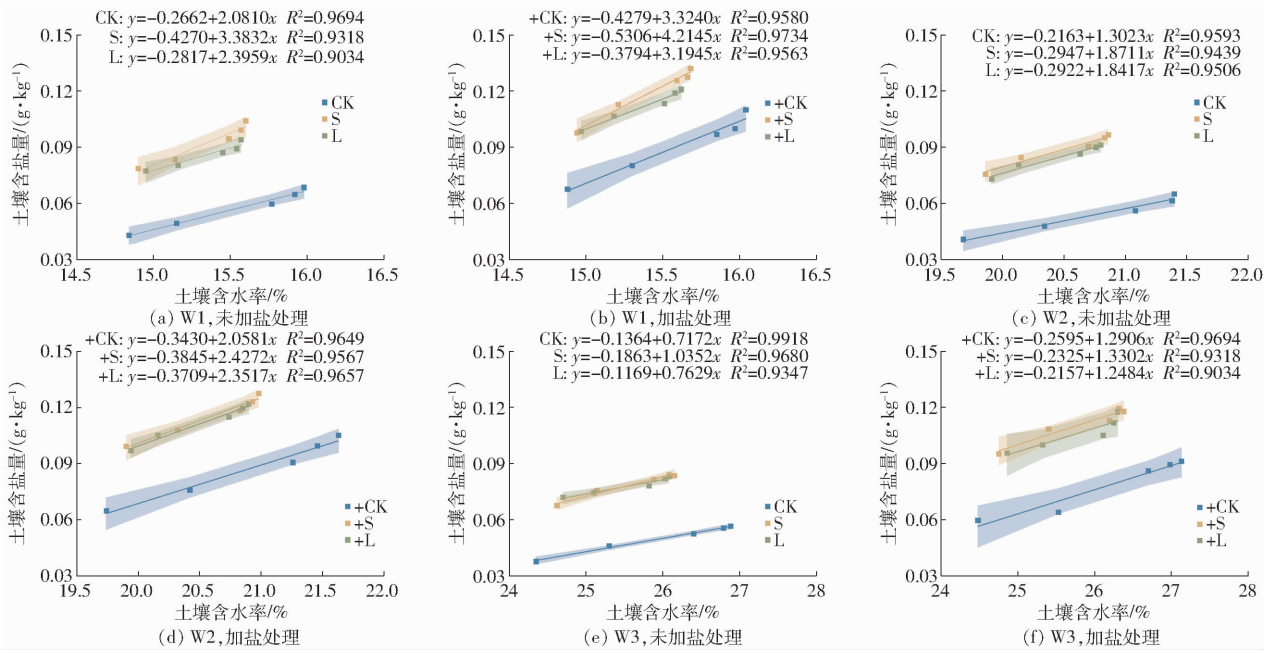

图 9　不同调控措施下土壤含水率与含盐量响应关系

Fig. 9　Responses of soil water content to salt content under different control measures

3　讨论

3.1　不同调控措施对土壤结构状况的影响

3.1.1　不同调控措施对土壤孔隙分布的影响

土壤冻结过程中液态水发生相变，体积膨胀使得孔隙向更大一级孔隙转变[29]。冻融循环过程中，上层未冻水含量逐渐下降，土壤基质势降低，液态水向冻结锋面迁移，迁移力迫使部分非贯通细小孔隙融合成水分通道[30]，继续冻结使土壤孔隙进一步变大，而更高的土壤含水率提高了冻融过程中液态水迁移量，从而加剧水分相变导致的孔隙扩张现象。同时土壤在冻融作用下的团聚体破碎瓦解和湿润土壤易发生轻微冻涨等原因也进一步提升了较高含水率土壤孔隙的变化幅度[31]。此外，由于含盐量增加导致的土壤溶质势增加及冰点降低现象也会提升水分迁移总量[32]，从而进一步提高孔隙扩张幅度。生物炭自身具有多孔性及吸附性，向土壤中施加生物炭可减小频繁冻融循环对土壤结构的破坏，使土壤结构更加稳定[33]。同时，生物炭可明显抑制由基质势、溶质势引起的液态水向冻结锋面不断累积以及水分相变等原因导致的孔隙膨胀现象，降低了土壤孔隙持续增长为大孔隙的转化率。

生物炭内部存在较多孔隙使得土壤总孔隙度增加[34]，且生物炭与土壤混合更易形成团聚体使中孔隙增加，这与 HUSSAIN 等[35]的研究结果相似。由于大粒径生物炭内部小孔隙更多，所以出现 L 处理的小孔隙下降比例小于 S 处理的结果，且大粒径生物炭对土壤水分吸附力强于小粒径生物炭，即 L 处理更能降低冻融过程中的土壤孔隙扩张现象，从而降低大孔隙增加幅度。总体上看，L 处理更能在寒区环境下稳定土壤的孔隙分布状况。由于土壤颗粒吸附作用，植物不能利用土壤小孔隙中的水分[36]，且大孔隙水分易受重力作用向下迁移汇入地下水，所以施加生物炭可调控土壤孔隙分布状况从而增加土壤的植物水分利用效率[37]，有效缓解粮食产量增加与旱区水分亏缺的冲突。

3.1.2　不同调控措施对土壤团聚体稳定性的影响

冻融作用会改变土壤孔隙状况及土壤团聚体稳定性，从而影响土壤结构稳定性[38]。MA 等[39]研究表明冻融过程中大孔隙数量增加与团聚体稳定性呈负相关趋势，本研究结果与之相似。冻结过程中团聚体内部及附近形成的冰晶体改变了土壤颗粒的排列结构，但在融化过程中却无法恢复原位，多次冻融后形成裂缝并与外部孔隙连接[40]，导致土壤团聚体逐渐破碎，土壤小孔隙也会在这一过程中增加。随着含水率升高，冻融作用对土壤团聚体的破坏更加严重。土壤中加入生物炭后可通过炭颗粒的强吸附性增强团聚体内部颗粒的吸引力[41]，使骨料结构更加稳定，从而减小冻融作用产生的结构破坏。冻融循环初期，由于大粒径生物炭更优异的固持水分性能，L 处理土壤 MWD 高于 S 处理。但随着冻融循环的进行，L 处理中冻融作用所导致的生物炭内部水分相变使得大粒径生物炭发生不同程度破碎[42]，降低其吸附能力，导致冻融结束后 L 处理对 MWD 的调控效果下降，但仍优于 S 处理。在图 3 可看到盐分对土壤初始团聚体并未产生明显影响，但由于

含盐量升高使水分运动更活跃,多次冻融后对高盐分土体团聚体的破坏增加,导致在冻融后高盐土壤 MWD 下降比例更大。

3.2 不同调控措施土壤结构状况对土壤渗透性的影响

饱和土壤中液态水完全充满土壤孔隙,形成外界液态水流经土壤的通道,土壤总孔隙度越大,供水分流动的路径总体积越大[43]。冻融循环作用下土壤总孔隙度上升,这利于土壤内部液态水流动。同时,吕捷等[44]指出,土壤内互相连通的大孔隙易形成水分运动的优先通道,即土壤大孔隙占比成为影响土壤饱和导水率的重要参数。土壤在初始状态时,较高含水率土壤其内部孔隙连通性也相对较好,利于水分在土壤内纵向流动,且冻融循环结束后,初始含水率较高的土壤大孔隙占比增加幅度也较大,导致经历冻融期后的高含水率土壤饱和导水率上升幅度也高于低含水率土壤。施入生物炭不仅可以调节土壤的孔隙分布状况,还可以缓解冻融期土壤的孔隙扩张情况,降低土壤大孔隙占比,从而降低了土壤饱和导水率,使土壤在冻融前后的饱和导水率都能维持在适宜区间内,既能吸附保留适当的水分满足植物生长要求,又能防止过高的导水能力使孔隙水向下汇入地下水,提高了农田土壤水分利用效率。

k_{fs}对土壤水分-溶质协同运移起到重要作用[45]。随着温度降低,土壤孔隙中的水分逐渐被冻结,可供液态水运动的未冻结孔隙慢慢减少,使得各处理 k_{fs}均出现下降趋势。对比图 5 中 k_{fs}随温度的变化趋势可发现,在 -0.5℃时,土壤全部孔隙几乎均已冻结。本研究中土壤经过冻融循环后 k_{fs}出现下降趋势,这与 MAKUSA 等[46]的试验结果相似,土壤在经历多次冻融循环作用后因其孔隙结构变化,在 -0.1℃及之后的各个温度下土壤孔隙更易冻结,即对温度的敏感度加强。同时,土壤含水率增加也会增大土壤结构变化幅度,导致冻融后 k_{fs}下降率增加。生物炭施加增加了土壤结构的稳定性、抑制土壤结构形变与轻微的土壤冻胀。Gibbs - Thomso 效应表明,土壤孔径越小,冻结温度越低。尽管生物炭处理会导致土壤小孔隙占比降低,但向土壤中施加生物炭会增加土壤总孔隙度,使土壤小孔隙体积仍大于未施加生物炭处理的土壤[47],从而降低了土壤冻结温度。这导致施加生物炭处理的土壤冻结过程会延后,从而使相同温度下生物炭处理的土壤渗透能力增加。而施加大粒径生物炭的土壤导水性优于小粒径生物炭,所以冻融前后 k_{fs}由大到小依次为 L 处理、S 处理、CK 处理,且冻融后 k_{fs}的下降幅度由大到小也依次为 L 处理、S 处理、CK 处理。本研究中另施加盐分处理的土壤不仅其本身溶质势增高会使土壤水分运动更活跃,带来更严重的土壤结构变形,导致 k_{fs}下降率高于未施加盐分土壤。

3.3 不同调控措施土壤渗透能力对土壤水盐运移的影响

自上而下单向的土壤冻融过程使冻结期上层土壤液态水先发生冻结现象[48],在上层土壤基质势降低、溶质势增加产生的牵引力作用下,底层土壤水分向上迁移[49],融化期土壤部分水分受重力势能作用影响又向下补给深层潜水,而水分向上迁移量大于重力水下沉量,最终导致水分在土壤表面聚集。在实际环境中,寒区野外冻融期外界空气干燥,土壤表面水分蒸发可能会加剧水分的上迁总量,并导致土壤板结现象发生[50],既威胁植物根系正常呼吸又不利于融化期融雪水入渗,降低了水资源利用效率,使土壤干旱问题进一步加剧。冻结期表层水势降低[51],同时土壤盐分升高导致冻融过程中各层土壤间盐分浓度梯度增加,在此双重作用下水分上迁量呈增加趋势。生物炭内部孔隙可以固持水分,加入生物炭后土壤水向上迁移量明显下降,与 CK 处理相比,施加生物炭土壤在冻融结束后各土层间含水率差距有所降低。大粒径生物炭对因冻融作用改变土壤孔隙分布和延缓 MWD 下降的效果更强,更能增强土壤保水性,从而保证了植物根系发育所需的土壤生态环境[52]。

与水分运动类似,盐分在冻融期间同样出现表层累积现象。这是因为溶质迁移的主要方式为液态水对流和溶质浓度差引起的自由扩散[53],冻结过程中水分携带溶质一起逐渐向上迁移[54],导致上层土壤 EC 升高。且底部土壤水分上迁时也会携带溶质上移,使活动层土壤更易发生盐渍化[55],同时,实际环境中上层水分蒸发会使表面土壤部分溶质析出,析出的溶质并不会在融化期因重力作用向下运动[56],加重了低含水率土壤盐渍化问题。施加生物炭增强了土壤持水性能,减弱了土壤纵剖面中剧烈的水盐协同运动现象,所以相对于 CK 处理,L 处理和 S 处理在各土层中的溶质迁移量均有下降,且由于大粒径生物炭更能增强土壤保水性,并减弱上层土壤 EC 上升率,能有效调控活动层土壤水盐再分布并预防土壤盐渍化现象发生。

4 结论

(1)冻融循环过程中,各处理土壤大孔隙占比平均上升 57.94%,小孔隙占比平均下降 14.72%,土壤团聚体稳定性逐渐下降,土壤孔隙结构改变。且随着初始含水率与含盐量增加,冻融作用对土壤

结构的破坏程度升高。

(2)土壤大孔隙占比与 k_s、小孔隙占比与 k_{fs} 之间有明显的相关性。随着冻融过程中土壤小孔隙占比下降、大孔隙占比提升,各处理冻融循环后 k_s 平均升高 5.70%、-0.1℃时 k_{fs} 平均降低 28.93%。土壤初始水盐含量的提升均增加了土壤冻融过程中 k_s、k_{fs} 的变化幅度。

(3)冻融后各处理上层土壤含水率平均上升 6.49%,EC 平均上升 36.04%,且土壤初始水盐含量增加提升了冻融后底层土壤水盐向上迁移量。

(4)施用生物炭可提高土壤团聚体稳定性,抑制土壤大孔隙上升幅度,降低小孔隙下降比例,从而使 S、L 处理冻融后 k_s 上升幅度分别平均降低 48.35%、37.69%,k_{fs} 下降幅度分别平均降低 55.44%、78.55%。同时减弱了水盐运动趋势,与 CK 处理相比,S、L 处理使冻融后上层土壤含水率上升幅度平均降低 40.03%、46.92%,EC 上升幅度平均降低 50.72%、62.23%。综合土壤结构状况、土壤渗透性、土壤水盐再分布等指标变化特征,大粒径生物炭对黑土区土壤的改良效果优于小粒径生物炭。

参 考 文 献

[1] ZHANG X D, WU Y J, ZHAI E C, et al. Coupling analysis of the heat-water dynamics and frozen depth in a seasonally frozen zone[J]. Journal of Hydrology, 2021, 593(1): 65-69.

[2] 李南生, 芦赫, 王雨舟. 寒区碾压土多周期冻融循环热水力耦合分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(1): 98-103.
LI Nansheng, LU He, WANG Yuzhou. Thermo-hydro-mechanical coupling analysis for rolled filled earth in cold region under multicycle of freezing and thawing cycle[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(1): 98-103. (in Chinese)

[3] 刘淑珍, 刘斌涛, 陶和平, 等. 我国冻融侵蚀现状及防治对策[J]. 中国水土保持, 2013(10): 41-44.

[4] 付强, 石净, 李天霄, 等. 不同调控模式下寒区土壤物理结构与水力特性改良研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 374-385.
FU Qiang, SHI Jing, LI Tianxiao, et al. Improvement of soil physical structure and hydraulic characteristics in cold regions by different regulation modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 374-385. (in Chinese)

[5] OZTAS T, FAYETORBAY F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1): 1-8.

[6] 李志飞, 徐金忠, 杨庆楠. 黑土坡耕地融雪径流及氮磷特征[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(2): 79-81.
LI Zhifei, XU Jinzhong, YANG Qingnan. Characteristics of snow melt runoff and nitrogen and phosphorus in black soil slope[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2023, 6(2): 79-81. (in Chinese)

[7] YU P F, LI T X, FU Q, et al. Effect of biochar on soil and water loss on sloping farmland in the black soil region of northeast China during the spring thawing period[J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1-16.

[8] LI Y, ZHANG F, YANG M, et al. Impacts of biochar application rates and particle sizes on runoff and soil loss in small cultivated loess plots under simulated rainfall[J]. Science of the Total Environment, 2018, 649: 1403-1413.

[9] BUTNAN S, DEENIK J L, TOOMSAN B, et al. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy[J]. Geoderma, 2015, 237: 105-116.

[10] AGEGNEHU G, SRIVASTAVA A K, MICHAEL I B. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: a review[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 119: 156-170.

[11] YANG R Y, ZHOU C X, ZHU J J, et al. Effects of biochar application on phreatic water evaporation and water-salt distribution in coastal saline soil[J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(10): 1-11.

[12] LV Y, ZHAO X Y, SHU Y Q, et al. Effect of biochar on the migration and leaching of phosphorus in black soil[J]. Paddy Water Environment, 2021, 19(1): 1-9.

[13] LASKAR A H, MAURYA A S, SINGH V, et al. A new perspective of probing the level of pollution in the megacity Delhi affected by crop residue burning using the triple oxygen isotope technique in atmospheric CO_2[J]. Environmental Pollution, 2020, 263: 114542.

[14] MARRIS E. Putting the carbon back: black is the new green[J]. Nature, 2006, 442(7103): 624-626.

[15] HAYASHI M. The cold vadose zone: hydrological and ecological significance of frozen-soil processes[J]. Vadose Zone Journal, 2013, 12(4): 37-49.

[16] SUN W J, LI M Y, ZHANG W J, et al. Saturated permeability behavior of biochar-amended clay[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(11): 3875-3883.

[17] STREUBEL J D, COLLINS H P, GARCIA-PEREZ M, et al. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(4): 1402-1413.

[18] JUN Z, JAMES E A, MARKUS F. Effect of biochar and biochar particle size on plant-available water of sand, silt loam, and clay soil[J]. Soil Tillage Research, 2021, 212: 104992.

[19] EDEH I. G, MASEK O, BUSS W. A Meta-analysis on biochar's effects on soil water properties-new insights and future

research challenges[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 714: 136857.
[20] LIU Z L, DUGAN B, MASIELLO C A, et al. Impacts of biochar concentration and particle size on hydraulic conductivity and DOC leaching of biochar-sand mixtures[J]. Journal of Hydrology, 2016, 533: 461 - 472.
[21] TANG E S, LIAO W X, THOMAS S C. Optimizing biochar particle size for pant growth and mitigation of soil salinization[J]. Agronomy, 2023, 13(5): 1394.
[22] ZHANG H Y, PANG H C, ZHAO Y H, et al. Water and salt exchange flux and mechanism in a dry saline soil amended with buried straw of varying thicknesses[J]. Geoderma, 2020, 365: 114213.
[23] FU Q, ZHAO H, LI T X, et al. Effects of biochar addition on soil hydraulic properties before and after freezing-thawing[J]. Catena, 2019, 176: 112 - 124.
[24] 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: 133732.
[25] HE Z, HOU R J, FU Q, et al. Evolution mechanism of soil hydrothermal parameters under freeze-thaw cycles: regulatory significance of straw and biochar[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 385: 135787.
[26] DAGESSE D. Freezing cycle effects on water stability of soil aggregates[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 93(4): 473 - 483.
[27] FENG M, LEI C, LI D Q, et al. Estimation of hydraulic conductivity of saturated frozen soil from the soil freezing characteristic curve[J]. Science of the Total Environment, 2020, 698: 134132.
[28] LEI C, LI D, FENG M, et al. A fractal model of hydraulic conductivity for saturated frozen soil[J]. Water, 2019, 11(2): 369.
[29] LIU B, FAN H, HAN W, et al. Linking soil water retention capacity to pore structure characteristics based on X-ray computed tomography: Chinese Mollisol under freeze-thaw effect[J]. Geoderma, 2021, 401: 115170.
[30] BING H, HE P, ZHANG Y. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(1): 675 - 681.
[31] XIAO H, LIU G, LIU P, et al. Developing equations to explore relationships between aggregate stability and erodibility in Ultisols of subtropical China[J]. Catena, 2017, 157: 279 - 285.
[32] WANG Q, QI J, WANG S, et al. Effect of freeze-thaw on freezing point of a saline loess[J]. Cold Regions Science Technology, 2019, 170: 102922.
[33] ALGHAMDI A G, ALKHASHA A A, IBRAHIM H M. Effect of biochar particle size on water retention and availability in a sandy loam soil[J]. Journal of Saudi Chemical Society, 2020, 24(12): 1042 - 1050.
[34] SUN Z, MOLDRUP P, ELSGAARD L, et al. Direct and indirect short-term effects of biochar on physical characteristics of an arable sandy loam[J]. Soil Science, 2013, 178(9): 465 - 473.
[35] HUSSAIN R, GHOSH K K, RAVI K. Influence of biochar particle size on the hydraulic conductivity of two different compacted engineered soils[J]. Biomass Conversion Biorefinery, 2020, 13(2): 1 - 11.
[36] OMONDI M O. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using Meta-analysis of literature data[J]. Geoderma, 2016, 274: 28 - 34.
[37] OBOUR P B, RAZZAGHI F, ARTHUR E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and Meta-analysis [J]. Geoderma, 2020, 361: 114055.
[38] LEBEAU M, JEAN-MARIE K. An extension of the capillary and thin film flow model for predicting the hydraulic conductivity of air-free frozen porous media[J]. Water Resources Research, 2012, 48(7): 011916.
[39] MA R M, JIANG Y, LIU B, et al. Effects of pore structure characterized by synchrotron-based micro-computed tomography on aggregate stability of black soil under freeze-thaw cycles[J]. Soil Tillage Research, 2020, 207(3): 104855.
[40] WANG E, CRUSE R M, CHEN X W, et al. Effects of moisture condition and freeze/thaw cycles on surface soil aggregate size distribution and stability[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(3): 529 - 536.
[41] OBIA A, MULDER J, MARTINSEN V, et al. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils[J]. Soil Tillage Research, 2016, 155: 35 - 44.
[42] LIU Z, DUGAN B, MASIELLO C A, et al. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties[J]. PLoS ONE, 2017, 12(6): e0179079.
[43] 张锦华, 李明思, 韩寒, 等. 非饱和土壤中大孔隙流的影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 70 - 77.
ZHANG Jinhua, LI Mingsi, HAN Han, et al. Factors affecting macropore flow in unsaturated soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 70 - 77. (in Chinese)
[44] 吕捷, 樊秀峰, 吴振祥. 基于降雨染色示踪试验的大孔隙流特性研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(5): 109 - 114.
LÜ Jie, FAN Xiufeng, WU Zhenxiang. Research on macropore flow characteristics based on rainfall dyeing tracer experiment [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(5): 109 - 114. (in Chinese)
[45] DUNCAN S J, DALY K R, SWEENEY P, et al. Mathematical modelling of water and solute movement in ridged versus flat planting systems[J]. European Journal of Soil Science, 2018, 69(6): 967 - 979.

(下转第 553 页)

[28] 商高高，刘韬，韩江义. 基于驱动效率的四驱拖拉机驱动系统优化设计[J]. 农机化研究，2022,44(1):242－247.
SHANG Gaogao, LIU Tao, HAN Jiangyi. Optimized design of four-wheel drive tractor drive system based on drive efficiency [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(1):242－247. (in Chinese)
[29] 刘世闯,孙桓五,王瑞鑫,等. 大功率型燃料电池重卡动力系统匹配设计[J]. 汽车工程,2021,43(2):196－203.
LIU Shichuang, SUN Hengwu, WANG Ruixin, et al. Matching design of power system for high power hydrogen fuel cell heavy-duty truck[J]. Automotive Engineering, 2021,43(2):196－203. (in Chinese)
[30] 徐立友,刘孟楠,周志立. 串联式混合动力拖拉机驱动系设计[J]. 农业工程学报,2014,30(9):11－18.
XU Liyou, LIU Mengnan, ZHOU Zhili. Design of drive system for series hybrid electric tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(9):11－18. (in Chinese)
[31] 刘孟楠. 电动拖拉机设计理论及控制策略研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
LIU Mengnan. Study on theory and control strategy of electric tractor[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2020. (in Chinese)
[32] ABDOLMALEKI H, JAFARI A, TABATABAEIFAR A, et al. Development and evaluation of an in-situ tire testing facility with variable side slip angles[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 59: 49－58.
[33] 周志立,方在华,赵铨. 拖拉机-农具机组牵引性能的计算机辅助分析[J]. 农业机械学报,1991,32(4):7－14.
ZHOU Zhili, FANG Zaihua, ZHAO Quan. Computer aided analysis on the tractive performance of tractor－implement combinations[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1991,32(4):7－14. (in Chinese)
[34] 张俊江. 计及再生制动和乘坐舒适性的四驱纯电动汽车控制策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
ZHANG Junjiang. Study on the control strategy for four-wheel drive pure electric vehicle considering regenerative braking and ride comfort[D]. Chongqing: Chongqing University,2021. (in Chinese)
[35] 高辉松,朱思洪. 电动拖拉机传动系设计理论与方法研究[J]. 南京农业大学学报,2009,32(1):140－145.
GAO Huisong, ZHU Sihong. Study on design theory and method for driving line of electric tractor[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2009,32(1):140－145. (in Chinese)

(上接第 482 页)

[46] MAKUSA G, MACSIK J, HOLM G, et al. Laboratory test study on the effect of freeze-thaw cycles on strength and hydraulic conductivity of high water content stabilized dredged sediments[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(6): 1038－1045.
[47] ZUO Y T, FU Q, LI T X, et al. Characteristics of snowmelt transport in farmland soil in cold regions: the regulatory mechanism of biochar[J]. Hydrological Processes, 2022, 36(2): e14499.
[48] HOU R J, LI T X, FU Q, et al. Research on the distribution of soil water, heat, salt and their response mechanisms under freezing conditions[J]. Soil Tillage Research, 2020, 196: 104486.
[49] QI Z, HAO F, YING Z, et al. Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 219－231.
[50] REN R, MA J J, CHENG Q Y, et al. An investigation into the effects of temperature gradient on the soil water-salt transfer with evaporation[J]. Water, 2017, 9(7): 456.
[51] ZHANG X D, WANG Q, YU T W, et al. Numerical study on the multifield mathematical coupled model of hydraulic-thermal-salt-mechanical in saturated freezing saline soil[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(7): 04018064.
[52] CHEN L J, FENG Q, WEI Y P, et al. Effects of saline water irrigation and fertilization regimes on soil microbial metabolic activity[J]. Journal of Soils Sediments, 2016, 17(2): 376－383.
[53] LU J G, ZHANG M Y, ZHANG X Y, et al. Experimental study on the freezing-thawing deformation of a silty clay[J]. Cold Regions Science Technology, 2018, 151: 19－27.
[54] YANG M, YANG R, LI Y, et al. Effects of different biomass materials as a salt-isolation layer on water and salt migration in coastal saline soil[J]. PeerJ, 2021, 9: e11766.
[55] WU M S, WU J W, TAN X, et al. Simulation of dynamical interactions between soil freezing/thawing and salinization for improving water management in cold/arid agricultural region[J]. Geoderma, 2019, 338: 325－342.
[56] WAN X S, GONG F M, QU M F, et al. Experimental study of the salt transfer in a cold sodium sulfate soil[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(4): 1573－1585.