

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.01.017

CSTR:32310.14.stbcb.2026.01.017

刘亚鑫, 陆培榕, 李印娟, 等. 麦壳添加对盐渍滩涂土壤水盐运移及干缩性状的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(1):267-279.

LIU Yaxin, LU Peirong, LI Yinjuan, et al. Effect of wheat husk addition on water-salt transport and drying shrinkage characteristics of saline tidal flat soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):267-279.

麦壳添加对盐渍滩涂土壤水盐运移及干缩性状的影响

刘亚鑫¹, 陆培榕¹, 李印娟¹, 林驰², 于利骁¹, 张子坤¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏扬州 225009; 2. 江苏省水利机械制造有限公司, 江苏扬州 225001)

摘要: [目的] 为探究在干湿循环下麦壳添加对盐渍滩涂土壤水盐运移及土壤结构功能稳定性的影响。[方法] 以江苏省滨海滩涂盐渍土为研究对象, 基于土柱试验, 分析 H0、H1、H2、H3 4 种麦壳添加量(分别为 0、10、15、20 g/kg)、B1、B2、B3 3 种土壤回填压实度(1.30、1.35、1.40 g/cm³)及 C2、C4 2 种干湿循环轮次(2 轮、4 轮)对水分蒸发速率、盐分质量分数、土壤机械组成及干燥收缩量等指标的影响。[结果] 1) 在蒸发阶段, 土壤累计蒸发量与麦壳添加量呈显著正相关, H1~H3 平均较 H0 提高 22.1%; 添加麦壳能够抑制盐分在土体表层(0~5 cm)的积聚, 且对返盐的抑制程度随干湿循环轮次的增加而提升; 在湿润阶段, 盐分淋洗量随灌水轮次增加而降低, 但随麦壳添加量增加而提升, H1~H3 盐分淋洗量平均值较 H0 提高 6.2%。2) 土壤干燥收缩量随麦壳添加量的增加而减小, H3 分别较 H1 和 H2 低 39.9%、23.7%, 但该效果随土壤压实度的提升而减弱; 干体质量随压实度的增大而显著提高, 但在压实度较低的 B1 和 B2 处理中, 增加干湿循环次数增大土壤体质量, 具体表现为 C4 处理下 B1 与 B2 的平均干体质量较 C2 处理分别提高 0.9%、0.6%。3) 干湿循环轮次显著影响粉粒和黏粒占比, 造成土壤可蚀性因子(K)增大, 但添加麦壳对土壤可蚀性因子无显著性调控。4) 干湿循环后 5~10 cm 土层中的麦壳向 0~5 cm 的表层迁移, 造成的麦壳垂向不均匀分布显著影响土壤水分蒸发及收缩量。[结论] 研究结果可为土壤细颗粒含量较高的滩涂盐渍土改良提供具有可持续效益的技术参考与理论依据。

关键词: 盐渍土改良; 麦壳添加; 土壤水盐运移; 干湿循环; 土壤机械组成

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0267-13

Effect of Wheat Husk Addition on Water-Salt Transport and Drying Shrinkage Characteristics of Saline Tidal Flat Soil

LIU Yaxin¹, LU Peirong¹, LI Yinjuan¹, LIN Chi², YU Lixiao¹, ZHANG Zikun¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. The Jiangsu General Factory of Water Conservancy Machinery, Yangzhou, Jiangsu 225001, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of wheat husk addition on water-salt transport and soil structural-functional stability in saline tidal flat soil during dry-wet cycles. [Methods] Taking saline soil samples collected from the coastal tidal flats in Jiangsu Province as the research object, soil column experiments were conducted to analyze the effects of four wheat husk addition rates (H0, 0 g/kg; H1, 10 g/kg; H2, 15 g/kg; H3, 20 g/kg), three soil backfilling compaction degrees (B1, 1.30 g/cm³; B2, 1.35 g/cm³; B3, 1.40 g/cm³), and two dry-wet cycle times (C2, two cycles; C4, four cycles) on indicators such as water evaporation rate, salt mass fraction, soil mechanical composition, and drying shrinkage. [Results] 1) During the evaporation phase, cumulative soil evaporation showed a significant positive correlation with wheat husk addition rate. H1—H3 treatments increased evaporation by an average of 22.1% compared to H0. Wheat husk addition inhibited salt accumulation in the soil surface layer (0—5 cm), and the inhibitory effect on salt accumulation enhanced with the increasing number of

收稿日期: 2025-06-22

修回日期: 2025-08-01

录用日期: 2025-08-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(52109068, 32301435); 教育部“春晖计划”合作科研项目(202201305); 中国博士后科学基金面上项目(2022M712690); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX24_2236)

第一作者: 刘亚鑫(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤水盐运移研究。E-mail: MZ120231185@stu.yzu.edu.cn

通信作者: 陆培榕(1992—), 男, 博士, 副教授, 主要从事灌溉排水理论与技术研究。E-mail: lupeirong@yzu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

dry-wet cycles. During the wetting phase, salt leaching amount decreased with the increasing number of irrigation cycles but increased with higher wheat husk addition. The average salt leaching in H1—H3 treatments increased by 6.2% compared to H0. 2) Soil drying shrinkage decreased with increasing wheat husk addition, with H3 being 39.9% and 23.7% lower than H1 and H2, respectively, while such effect weakened with higher soil compaction degree. The dry bulk density significantly increased with higher compaction degrees. However, under lower compaction treatments (B1 and B2), increasing the number of dry-wet cycles raised soil bulk density. Specifically, the average bulk densities for B1 and B2 under C4 treatment increased by 0.9% and 0.6%, respectively, compared to the C2 treatment. 3) The number of dry-wet cycles significantly affected the proportion of silt and clay particles, leading to higher soil erodibility factor (K), while wheat husk addition showed no significant regulatory effect on the factor. 4) Wheat husks in the 5—10 cm layer tended to migrate upward to the 0—5 cm surface layer after dry-wet cycles, and this vertical uneven distribution significantly affected soil water evaporation and shrinkage. [Conclusion] The findings provide sustainable technical references and theoretical foundations for improving coastal saline tidal flat soil with high fine-particle content.

Keywords: saline soil improvement; wheat husk addition; soil water-salt transport; dry-wet cycles; soil mechanical composition

Received: 2025-06-22

Revised: 2025-08-01

Accepted: 2025-08-25

Online(www.cnki.net): 2025-09-03

我国东部沿海地区逐年外扩的盐渍滩涂是极具开发潜力的一类后备耕地资源^[1]。然而,周期性的海水入侵伴随季节性的雨旱交替气候,导致滩涂区域潜水中可溶性的矿物质不断上溯并积聚,造成土壤盐碱化^[2]。同时,盐渍滩涂有机质含量较低,土壤中团聚体稳定性差,失水后干缩程度高、裂隙发育明显,降雨或地表径流对土壤的侵蚀性强,土壤颗粒易呈不均匀分布现象^[3],伴随形成的致密层或深层裂隙对土壤结构造成严重破坏,制约滩涂农业的开发潜力。因此,优化土壤空间结构,增强水分对盐分的淋溶效应,并调控干湿缩胀对土体颗粒的影响,是提升沿海滩涂地区土壤可耕性的关键。

秸秆还田作为当前普及度最高的土壤结构调控措施,凭借其材料来源广、实施难度低、可持续性强等优势,已在滩涂盐渍土改良方面取得实质性的成效^[4-5]。已有研究^[6]表明,作物秸秆混合于土壤后能有效提升土壤内大孔隙占比,降低土壤体积质量,提高土壤的饱和和水分体积分数与导水能力,进而增强降雨或灌溉条件下土壤溶质的淋洗效果^[7-8],且随还田历时延长,秸秆腐解生成的腐殖质将促进土壤大团聚体的胶结成形,使得土壤结构稳定性进一步提升^[9]。秸秆与土壤颗粒间的黏结强度和摩擦力能够有效地限制土壤基质的相对位移,限制干缩过程中土壤大孔隙的扩张,降低土体的收缩量^[10]。然而,常规的还田秸秆主要以收获后作物残余的茎、叶及根系为主,其形状和体型的不规则性易导致还田后秸秆在土体内分布不均,土壤裂隙在缺少秸秆的区域

开裂程度较高,并在干湿循环的作用下裂隙的扩张将呈累加效应,造成土壤持水能力下降及结构强度降低^[11],导致整体的改土效益下降。已有研究^[12]表明,碎化秸秆将有助于提升土壤与秸秆的接触,改善孔隙分布均匀性,显著增强土壤的持水与供水能力;同时,碎化的秸秆能够提供更多的表面积供生化反应,使得有机胶结物质的释放进程缩短,加快大团聚体的形成^[13]。然而,通过碎化秸秆的方式可增益改土效果,但此举对专业机械和加工能耗具有额外需求,将导致在改土需求面广量大的滩涂地区实施成本过高。

谷物籽粒的颖壳(如稻壳、麦壳等)是作物生长过程中用于抵御外界环境影响,防止虫鸟啃食的外层保护组织,其主体成分为纤维素、木质素及少量非定形二氧化硅,质地结构粗糙且具有多孔性及良好的结构韧性^[14-15]。颖壳的材料来源广泛,同一类谷物产出的颖壳形态大小基本统一,无需额外加工即可获得较高的碎化度,在保障经济效益的同时有助于提升改土程度的均匀性。因此,可将技术成熟度较高的秸秆还田模式作为一种研究参照,拓展应用至谷物颖壳等有机物料。邢旭光等^[16]研究发现,相比于添加麦秆的土壤,添加麦壳可有效减少失水过程中土体内短裂缝的生成,减少土壤整体的垂向收缩程度;赵丽丽等^[17]基于连续 2 a 的田间定位试验,定量论证增施麦壳可促进土壤原有孔隙向较大孔隙发育,并显著提升 0~10 cm 土层的孔隙连通性,进而增加土壤的导气率。在黏粒占比超过 50%

的土壤中, BALDIN 等^[18]通过添加稻壳提升土体的抗压强度, 降低土壤的刚性, 但需稻壳的添加量 >1.0% 时, 才能出现显著的调控效果。在土壤溶质调控方面, 谷物颖壳短期内通过影响土壤水分运移来间接调控溶质的分布^[19], 长期则可由分解产生的腐殖质吸附盐基离子, 降低土壤盐分^[20]。上述研究聚焦于土壤孔隙结构和理化性质在单轮干湿过程中的响应特征或多年还田后的累积效应, 而添加谷物颖壳后, 针对多轮干湿缩胀条件下水盐运移及土颗粒分布状况则有待探明, 需进一步论证谷物颖壳还田在沿海滩涂气候下的适用性。另外, 以片、屑形态为主的谷物颖壳, 灌水淋洗时可能在土壤大孔隙内随水分迁移或起浮, 导致分布均匀性的下降, 影响其对土壤结构的调控效果, 故有必要明确颖壳在干湿过程后的迁移程度, 以确定其分布状况对改土效益的影响。

综上, 本研究以粉质壤土为主的江苏沿海滩涂盐渍土为研究对象, 基于不同麦壳添加量的土柱试验, 探究土壤压实度和多轮干湿循环双重影响下土壤水盐运移状况及土壤颗粒的再分布特征, 量化分析土壤的收缩量与麦壳的迁移程度, 并评估麦壳添加后土壤对侵蚀的敏感性, 旨在为提升沿海滩涂盐渍土的改良效益提供方式参考与科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土壤取样于江苏省东台市沿海滩涂区域 (32°57'04"N, 120°55'12"E)。取样地属亚热带季风气候, 四季分明, 雨热同期, 年平均气温 14~17℃, 年平均降水量 800~1 200 mm^[21], 约 65% 以上的降雨集中在每年 6—9 月。取样点距离海岸线约 4.2 km, 距海平面高程约 2.0 m。按照分层随机取样法采集地表以下 0~30 cm 土层土样, 土壤平均湿体积质量为 1.31 g/cm³, 每个取样点取 100 kg 土壤, 取样点间平均间距 50 m, 将取回的土样充分搅拌均匀并置于干燥通风的环境内。试验土壤中砂粒、粉粒及黏粒占比分别为 30.12%、65.62% 及 4.26%, 质地为粉质壤土, 饱和质量含水率及田间持水量分别为 37.61%、30.89%, 全盐量为 5.65 g/kg, 有机碳质量分数为 8.74 g/kg。

试验使用的麦壳于 2023 年 6 月中旬取自江苏省东台市琼港农场 (32°43'12"N, 120°50'05"E) 中收获的冬小麦 (*Triticum aestivum* L.)。将采集到的麦穗进行晒干脱壳处理后, 收集的麦壳置于阴凉通风的库房内保存, 其堆积密度约为 65 kg/m³, 并置于 75℃ 烘箱中烘至恒重^[22], 供试麦壳的总碳质量分数采用重

铬酸钾氧化法^[23]测定, 为 (473±12.6) g/kg。麦壳中纤维素、半纤维素、木质素及灰分依照范氏纤维洗涤法^[24]测得, 相应成分占比分别为 44.5%±1.2%、25.9%±0.8%、18.9%±0.5%、4.7%±0.3%。

1.2 试验装置及处理设计

试验装置以可拼接的透明有机玻璃柱为核心结构 (图 1), 装置可拆分为上方的灌水柱, 中部的填土柱, 以及底部的储水底座。上部灌水柱 (内径 12 cm, 高度 18 cm, 壁厚 0.5 cm) 连通供水马氏瓶, 在灌水入渗时可在土表上方形成固定水头; 中部填土柱 (高度 20 cm) 由 2 块大小一致的半圆弧板衔接组成, 通过拆卸两侧条形法兰片上的螺栓实现土柱的整体取样; 底部储水底座用于收集土体底部的渗漏量, 其顶端为开孔隔板, 外侧设有排水及排气阀门, 底座内部容积约为 600 cm³。

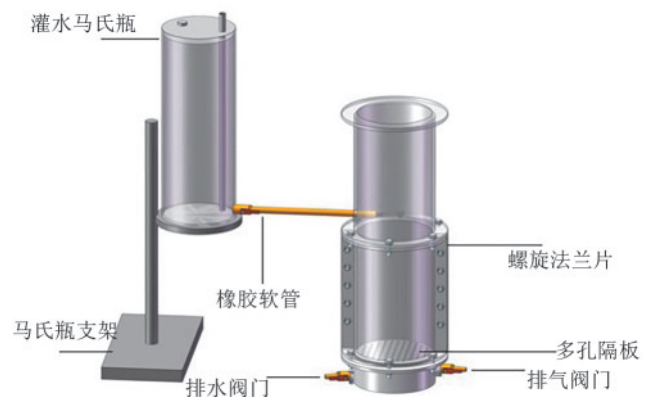


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

在装置填土前, 在储水底座的开孔隔板上方预先铺设 1 层 3 mm 厚的透水无纺布, 防止土壤颗粒随底部排水而渗漏。待所取土样的质量含水率风干至 7.5% 时, 破碎并过 2 mm 筛网, 与风干麦壳按还田土壤用量的 1%、1.5%、2% 进行混合 (对应每个土柱麦壳添加量为 10、15、20 g/kg), 并增设未添加麦壳的对照组。随后, 分别设计 1.30、1.35、1.40 g/cm³ 回填后的土壤压实度 (湿体积质量), 将土壤—麦壳混合物填充至土柱内, 采用分层压实法 (每层 5 cm, 共 4 层) 保障柱内体积质量的一致性。试验中, 每类土柱均设定 2 轮与 4 轮的干湿循环次数。研究采用完全随机组合设计, 共 4 种麦壳添加量 (H0, 0 g/kg; H1, 10 g/kg; H2, 15 g/kg; H3, 20 g/kg) × 3 种土壤回填压实度 (B1, 1.30 g/cm³; B2, 1.35 g/cm³; B3, 1.40 g/cm³) × 2 种干湿循环次数 (C2, 2 轮; C4, 4 轮) = 24 组处理, 每组处理设置 3 个重复。

1.3 试验过程及观测指标

在江苏省沿海滩涂地区, 由于受到亚热带季风

气候的影响,夏季地表蒸发及降雨过程均比较强烈,所以本研究采用灌水饱和湿润与外部热源干燥的方式来模拟研究区的状况。在灌水试验开始前,测定不同麦壳添加量和压实度下的土壤饱和和质量含水率(34.01%~39.58%),并据此计算各处理方式下土柱达到饱和状态所需的灌水量。结果表明,各处理的灌水量为 1 096~1 164 cm³,处理间最大差异仅为 68 cm³,为统一试验流程,本研究将湿润阶段的灌水量设定为 1 100 cm³。在灌水前,柱内土体表面贴合 1 层不锈钢丝网(8 目),防止表层土壤中混合的麦壳起浮。灌水时,采用供水马氏瓶在土体上方维持 3 cm 的恒定入渗水头,保持底部排气阀门开启,排水阀门关闭。当灌水结束后,静置土柱,待底座内的下渗水不再增加时,记录储水底座内水分体积,并通过蒸发结晶法测得水体盐分质量。随后,拆除上部的灌水柱,采用电子秤记录土柱整体质量,作为后续蒸发干燥阶段的质量初始值。

在蒸发干燥阶段,采用红外射灯(PHILIPS, BR125)作为外部热源加速土体水分蒸发。红外射灯距离土表 30 cm,在无风的室内环境下可使土壤表面温度维持在(38.5±3.2)℃。在干燥过程中,每隔 10 h 对土柱进行称重,记录观测时段内的水分损失量,并计算所有土柱单位时间内的蒸发速率。当连续 2 轮称重间隔内土柱的质量变化差异<0.2%时,终止红外射灯干燥,计算干燥阶段内的土体蒸发速率。

$$E = 10\Delta V / (\Delta T \pi r^2) \quad (1)$$

式中: E 为土柱的蒸发速率,mm/h; ΔV 为称重间隔内土柱水分的耗散量,cm³;本研究将水体密度统一假定为 1.0 g/cm³; ΔT 为土柱称重的时间间隔,h; r 为土柱横截面半径,cm。

干燥阶段结束后,各土柱装置内土体上部呈圆台状收缩(图 2)。采用游标卡尺对土体进行轮廓收缩的测量,并对收缩体积进行估算,具体计算式为:

$$V_s = V_0 - \frac{\pi h_s}{12} (d_0^2 + d_s^2 + d_0 d_s) - \frac{\pi d_0^2}{4} (h_0 - h_s - \Delta h) \quad (2)$$

式中: V_s 为装置内土体的轮廓收缩体积,cm³; V_0 为装置内土体的初始体积,cm³,所有土柱均为 2 261 cm³; d_0 为土柱的初始直径,cm, $d_0=12$ cm; d_s 为干燥收缩后土柱上表面直径,cm; h_0 为初始土体高度,cm, $h_0=20$ cm; h_s 为干燥收缩形成的上部圆台高度,cm; Δh 为

土柱上表面的纵向收缩量,cm。

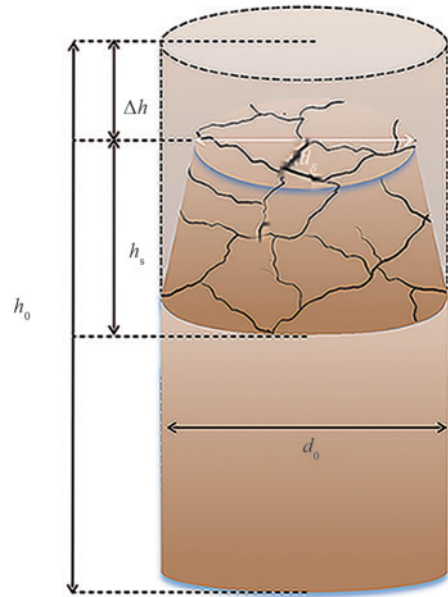


图 2 试验土柱轮廓收缩示意

Fig. 2 Schematic diagram of experimental soil column profile shrinkage

在设定的干湿循环轮次结束后,将有机玻璃试验装置的衔接法兰拆卸,完整地取出干缩后的土体,并使用 0.2 mm 厚的牛皮纸贴合包裹。采用钢丝线锯将所取柱状土体沿横断面切片,切分点按初始 20 cm 高度土柱的状态,每隔 5 cm 切分,共切分为 4 块。每块切片进行 6 点随机取样,每点取约 15 g 剔除麦壳的土样进行土壤有机碳质量分数、土壤机械组成、土壤水分及盐分质量分数的测定。土壤样品的有机碳质量分数通过硫酸-重铬酸钾氧化外加热法^[23]测定。土壤干体积质量计算公式为:

$$\rho_b = \frac{m_s}{(1 + \theta_w) \times (V_0 - V_s)} \quad (3)$$

式中: ρ_b 为干湿循环结束后装置内土体的干体积质量,g/cm³; m_s 为土柱中装填土壤的质量,g; θ_w 为所取土样的质量含水率,%; V_0 为装置内土体初始体积,cm³; V_s 为轮廓收缩体积,cm³。

针对江苏省滨海垦区土壤结构稳定性差、易受降雨径流侵蚀的特点,本研究引入可蚀性因子(K)作为量化指标,旨在系统评估不同处理条件下土壤抗侵蚀能力的变化,采用 WILLIAMS 等^[25]提出的土壤侵蚀与土地生产力模型(erosion-productivity impact calculator, EPIC)进行估算,计算公式为:

$$K_{EPIC} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.025 6 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left[1.0 - \frac{0.25C}{C + \exp(-2.95C + 3.72)} \right] \times \left[1.0 - \frac{0.71\text{SNI}}{\text{SNI} + \exp(-5.51 + 22.9\text{SNI})} \right] \quad (4)$$

式中: K_{EPIC} 为采用EPIC模型估算下的土壤可蚀性因子;SAN为粒径在0.05~2.0 mm的砂粒占比,%;SIL为粒径为0.002~0.05 mm的土壤粉粒占比,%;CLA为粒径为0~0.002 mm的土壤黏粒占比,%;C为土壤有机碳质量分数,%;其中, $\text{SNI}=1-\text{SAN}/100$; K_{EPIC} 值单位为美国制,计算后乘以0.131 7将其转化为国际制单位 $(\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h})/(\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{hm}^2)^{[26]}$ 。

采用电导率仪在室温下测定土壤浸提液(土水质量比1:5)的电导率,并对比蒸发结晶法测定的土壤浸提液全盐量,建立电导率转换为全盐量的线性关系式为:

$$C_m = 3.23\text{EC}_{1:5} + 0.14 \quad (5)$$

式中: C_m 为单位质量土样的盐分含量,g/kg; $\text{EC}_{1:5}$ 为土水比为1:5的土壤浸提液电导率,dS/m。拟合关系式涉及60个土壤样品,拟合精度 $R^2=0.93$ 。

为分析麦壳的迁移程度,本研究筛取干湿循环后每片土样内的麦壳。在指标测试所需土壤的样品取完后,将剩余的土壤切片浸泡于去离子水中,充分搅拌使土壤与麦壳分离,经孔径为1 mm的筛网过滤,再使用镊子收集筛网上的麦壳,并将收集的麦壳置于75 °C的烘箱内干燥至恒重后称重测量。干湿循环后,麦壳在土体中的分布状况采用克里斯琴森均匀度系数(christiansen uniformity, CU)定量表示^[27],该值可用于反映整个土柱的麦壳分布与平均值偏差的情况,计算公式为:

$$\text{CU} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |M_i - \bar{M}|}{\sum_{i=1}^n M_i} \right] \times 100\% \quad (6)$$

式中: M_i 为土柱中第*i*层麦壳的烘干质量,g; \bar{M} 为各土层内麦壳的平均质量,g; n 为柱内土体切割的层数, $n=4$;CU值越接近100%,表明麦壳在整个土体中分布越均匀。

1.4 统计分析方法

采用Duncan多重比较法对不同麦壳添加量及不同压实度处理下的试验结果平均值进行显著性分析($p<0.05$)。采用三因素方差分析(ANOVA)来检验麦壳添加量、土壤压实度、干湿循环轮次及其相互作用对土壤机械组成、麦壳质量分数、有机碳分数及可蚀性因子的影响。使用Pearson相关分析法检验土壤水盐运移、麦壳分布与土体结构及性状间的相关性。试验数据的处理及分析使用Office Excel 2021和SPSS 26软件完成。

2 结果与分析

2.1 土壤水分蒸发速率

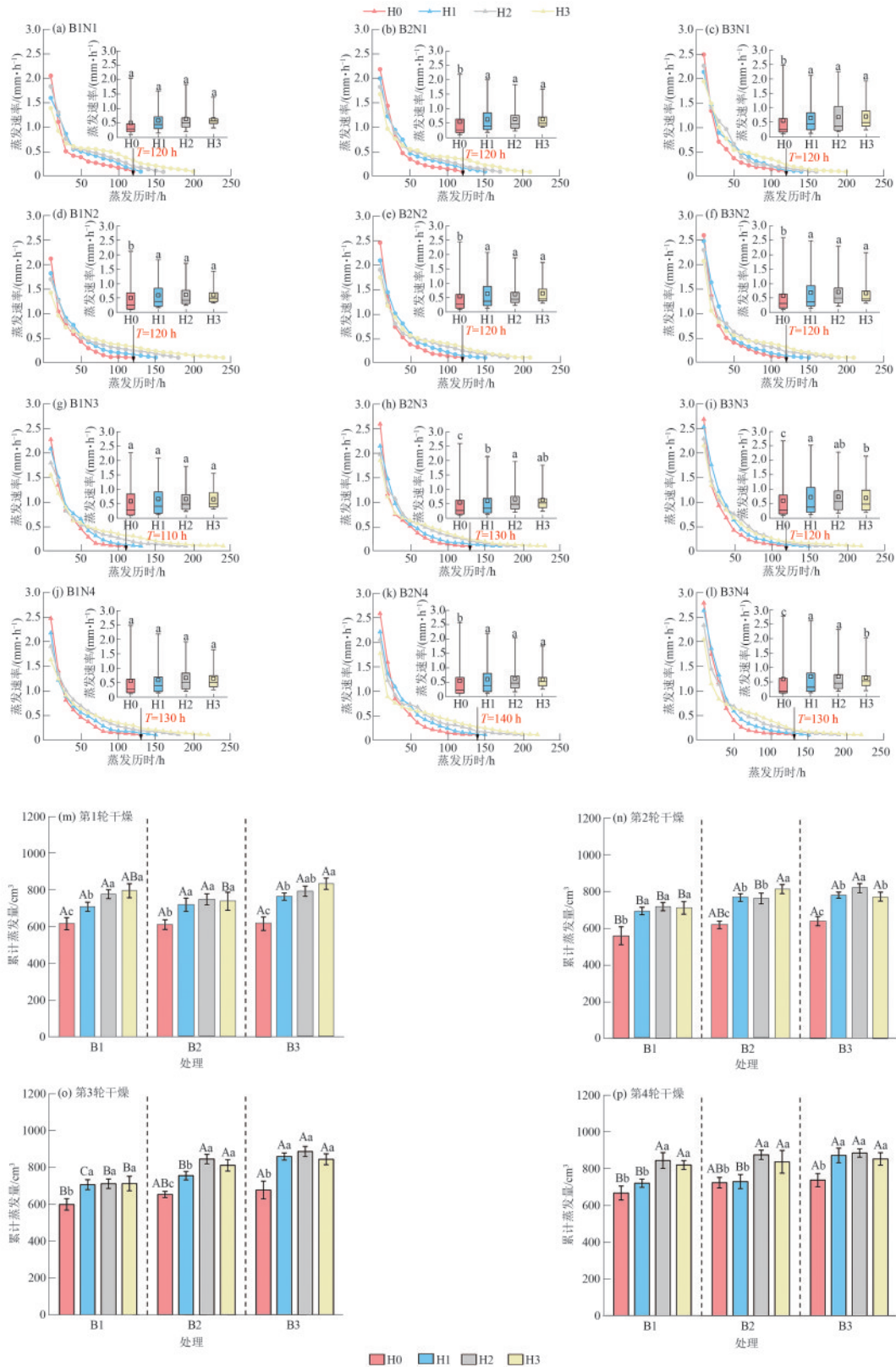
土壤水分蒸发速率的变化在各轮干燥过程中均呈指数型下降趋势(图3a)。在0~50 h内蒸发速率快速下

降,各处理在50 h时蒸发速率较初始值(10 h)平均下降约76.3%,且相同蒸发轮次内各处理间的蒸发速率变化差异较小。在50~150 h内蒸发速率下降趋势减缓,减缓程度随麦壳添加量的增大而减小。之后,蒸发速率变化趋于停滞,不同麦壳添加量处理下的差异再度缩小。随干燥轮次增加,初期蒸发速率也随之增大,各处理平均初始蒸发速率(10 h)从首轮干燥的1.9 mm/h逐渐扩增到第4轮干燥的2.3 mm/h,而各类处理达到干燥状态(连续2轮称重,质量差异 $<0.2\%$)所消耗的时间基本保持一致。添加麦壳的处理土壤平均蒸发速率普遍高于无麦壳的处理,但在前2轮蒸发过程中不同麦壳添加量间无显著性差异。添加麦壳的处理累计蒸发量显著高于无麦壳的处理,H1、H2、H3处理的平均累计蒸发量较H0提高22.1%。同时,增大压实度显著提升第2、3、4轮的累计蒸发量,且压实度的提升对麦壳添加量较低处理的累计蒸发量的提升程度更大(图3b),在第4轮蒸发过程中,H1处理在B3下的累计蒸发量较B1和B2分别提高21.0%、19.5%,提升幅度均明显高于H2处理下的4.9%、1.1%及H3处理下的4.0%、1.9%。

2.2 土壤盐分淋洗量及盐分垂向分布

由图4可知,各处理下土壤盐分的淋洗量随灌水轮次的增加而不断降低,在总淋洗盐分中,H1、H2、H3的盐分淋洗量平均值较H0提高6.2%。在第1、2轮灌水淋洗后,同一压实度下土壤盐分淋洗量随麦壳添加量的增加而显著提升,H3、H2和H1处理的盐分淋洗量比无麦壳的H0处理分别提高23.0%、14.1%、8.7%,而在第3、4轮灌水淋洗后,各压实度下无麦壳处理的盐分淋洗量则略高于添加麦壳的处理,但无显著差异。压实度较高的B3处理在4轮灌水后的盐分淋洗总量比B1和B2处理分别提高20.5%、17.7%,且麦壳添加对高体积质量处理的盐分淋洗量提升程度更大。在B3处理中,添加麦壳处理的第1轮平均盐分淋洗量较H0处理提高16.2%,增幅高于体积质量较低的B1处理中的12.3%和B2处理的13.1%。

待干湿循环轮次结束后,以5 cm为深度间隔对土柱的盐分垂向质量分数及占比进行量化分析。在2轮干湿循环后(图5a),各处理的土壤残余盐分质量为10.0~12.0 g,且压实度越高的处理淋洗后盐分残余量越多。各处理表层土壤(0~5 cm)的盐分占比最高,且在相同压实度下麦壳添加量越高的处理表层含盐量越低,3类压实度下H3处理的表层平均盐分质量分数比H0、H1和H2分别低32.8%、23.9%、11.0%。随土层深度增加,盐分在15~20 cm土层内重新抬升,B1~B3处理下添加麦壳处理在15~20 cm土层内的盐分占比相较无麦壳的处理平均高出约2.3%。



注：图中第1,2轮蒸发过程为C2处理的2轮土壤水分蒸发速率与C4处理前2轮的水分蒸发速率的平均值,第3,4轮的蒸发过程为C4处理的后2轮蒸发速率的平均值(3组重复);箱形图的数据为相同压实度处理在同一蒸发轮次内,以H0处理达到干燥状态的蒸发历时长为标准时长,不同麦壳添加量处理在标准时长内的蒸发速率的波动值;箱形图上方不同小写字母表示同一蒸发轮次内相同压实度下不同麦壳添加量处理间的平均蒸发速率差异显著($p < 0.05$);箱体的上下边缘为分位数,箱体内外框为平均值;箱体外的上短竖线为最大值,下短竖线为最小值;柱状图上不同大写字母表示同一蒸发轮次内相同麦壳添加量下不同压实度处理间差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示同一蒸发轮次内相同压实度下不同麦壳添加量处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 3 不同处理下土壤水分蒸发速率及累计蒸发量

Fig. 3 Soil water evaporation rate and cumulative evaporation amount under different treatments

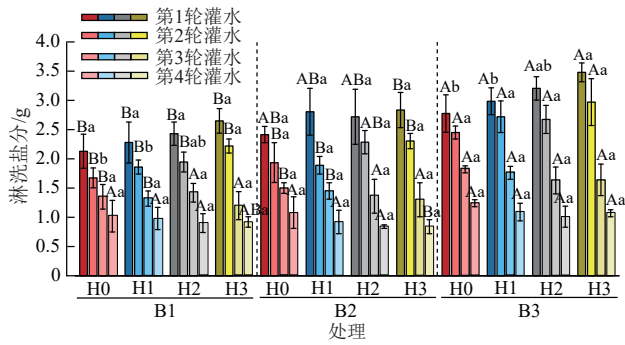


图 4 不同灌水轮次后土壤盐分淋洗量

Fig. 4 Soil salt leaching amount after different irrigation cycles

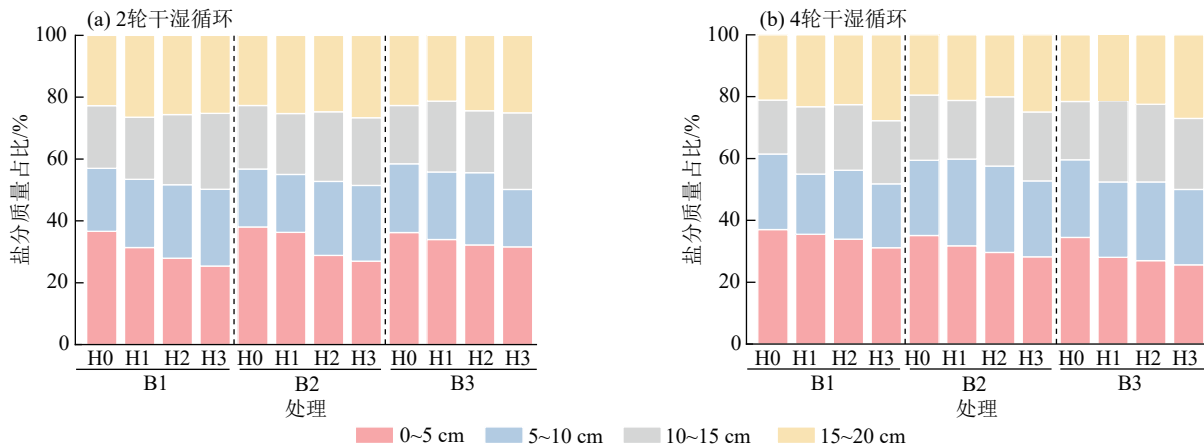


图 5 干湿循环后土壤盐分垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of soil salt after dry-wet cycles

2.3 干湿循环后土体的收缩量及干体积质量

图 6 为各处理在 2、4 轮干湿循环结束后试验装置内土体的收缩量及收缩后的干体积质量。在 2 轮干湿循环处理下,增大麦壳的添加量将显著降低土体的收缩量,H3 处理的收缩量在 3 组压实度下分别比 H1 和 H2 的低 39.9%、23.7%。提高压实度将降低土壤的收缩量,但降低程度随麦壳添加量的提升而减小。除 B3 处理外,压实度为 B1 和 B2 的处理在 4 轮干湿循环后的收缩量均高于 2 轮循环后的收缩量,平均提升程度分别为 31.2%、30.4%。在干体积

在经历 4 轮干湿循环后(图 5b),各处理土体内残余的盐分为 6.7~9.6 g,且相同压实度下麦壳添加量越高的处理盐分剩余量越低。表层土壤(0~5 cm)仍呈现出盐分积聚现象,但各处理在 0~5 cm 土层的平均盐分和占比相较于 2 轮循环后分别下降 0.9 g 和 0.8%。4 轮灌水后,15~20 cm 土层的盐分抬升程度均有所下降,但 H3 处理的抬升程度明显高于其余 3 组处理,甚至在 B3 压实度下,H3 处理的 15~20 cm 土层盐分占比高达 27.0%,超过 0~5 cm 表层的 25.6%。

质量方面,随压实度的增大,土壤干体积质量也随之提高。2 轮循环处理下,B3 处理的干体积质量平均值分别较 B1 和 B2 提高 7.3%、3.4%。增加干湿循环次数显著提升土壤干体积质量,除 B3 外,4 轮干湿循环后 B1 与 B2 的干体积质量分别较 2 轮循环提高 0.9%、0.6%。在相同压实度下不同麦壳添加量处理间的干体积质量差异较为显著,3 种压实度下的土壤干体积质量均随麦壳添加量的增加而显著下降,H3 处理的平均干体积质量分别较 H0、H1、H2 低 2.0%、1.1%、0.6%。

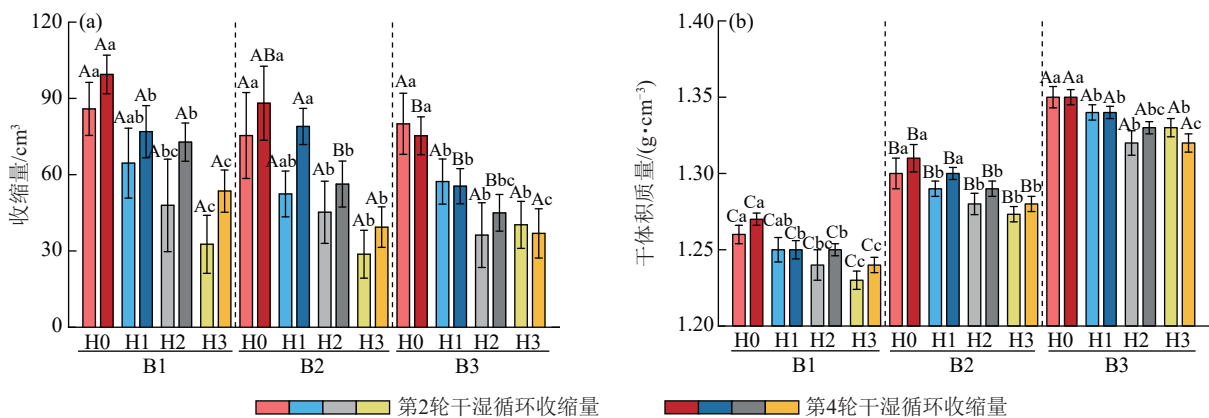


图 6 干湿循环结束后土体的收缩量及干体积质量

Fig. 6 Shrinkage volume and dry bulk density of soil after dry-wet cycles

2.4 土壤机械组成、麦壳质量与可蚀性因子的垂向分布变化

土体的压实度对土壤中砂粒($p < 0.01$)、粉粒($p < 0.05$)和黏粒($p < 0.05$)的占比均产生显著影响,且影响主要涉及表层(0~5 cm)和底层(15~20 cm)。由表1~表3可知,干湿循环轮次对粒径较小的粉粒和黏粒占比产生显著影响($p < 0.01$),2轮干湿循环下各处理平均粉粒占比相较4轮循环处理降低0.5%,而黏粒占比则较4轮循环处理提高0.3%(表1、表2)。压实度与麦壳添加量对黏粒占比存在显著的交互影响($p < 0.05$),具体表现为高压实度下的B3 H3处理使黏粒质量分数显著增加至2.49%,而低压实度

(B1)中添加麦壳的处理无显著差异。麦壳的分布呈一定的垂直分层变化特征,表层(0~5 cm)麦壳质量普遍较高,较B1(11.0 g)、B2(11.4 g)和B3(11.9 g)处理初始状态的表层麦壳质量分别提高20.9%、19.9%、18.8%,而5~10 cm土层内麦壳质量则较初始状态降低,B1、B2、B3处理的降幅分别为17.7%、20.5%、15.9%。10~15、15~20 cm土层内的麦壳质量变化程度较小,总体差异较低。干湿循环次数显著影响土壤可蚀性因子($p < 0.01$)和SOC质量分数($p < 0.05$),2轮干湿循环后各处理平均的 K_{EPIc} 值较4轮干湿循环后降低1.3%,而土壤SOC质量分数则同比增加2.65%。

表1 2轮干湿循环后压实度与麦壳添加量对土壤机械组成、麦壳质量、有机碳及可蚀性因子的影响

Table 1 Effects of compaction degree and wheat husk addition on soil mechanical composition, wheat husk content, organic carbon content, and erodibility factor after two dry-wet cycles

压实度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	麦壳添 加量/%	土层深 度/cm	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	麦壳质量/g	可蚀性因子/ ($10^2 t \cdot hm^2 \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot$ $mm^{-1} \cdot hm^{-2}$)	SOC/ ($g \cdot kg^{-1}$)
1.30	1	0~5	31.41±0.91Aa	65.80±0.61Ab	2.78±0.32Aa	8.54±0.85Ac	4.89±0.07Ab	11.82±0.65Aa
		5~10	30.16±1.58Aa	67.00±1.88Aa	2.84±0.40Aa	4.93±0.90Ac	4.90±0.25Aa	12.17±1.45Aa
		10~15	30.98±2.30Aa	66.16±2.12Aa	2.87±0.36Aa	6.95±0.71Ac	5.01±0.18Aa	11.02±1.18Aa
		15~20	30.16±1.52Aab	67.05±1.37Aab	2.80±0.20Aa	7.02±0.84Ac	4.95±0.18Aa	11.77±1.03Aa
	1.5	0~5	31.08±0.77Aa	66.17±0.77Ab	2.75±0.20Aa	11.98±1.09Ab	4.91±0.14Ab	11.84±1.06Aa
		5~10	30.34±0.75Aa	67.12±0.74Aa	2.55±0.12Aa	9.09±0.85Bb	4.91±0.20Aa	12.13±1.53Aa
		10~15	31.02±1.22Aa	66.39±1.33Aa	2.59±0.24Aa	10.24±0.82Ab	4.93±0.14Aa	11.71±1.18Aa
		15~20	31.78±1.81Aa	65.75±1.79Ab	2.47±0.19Bb	11.23±0.97Ab	4.93±0.15Aa	11.51±1.22Aa
	2	0~5	29.38±1.18Bb	68.11±1.09Aa	2.51±0.17Aa	15.43±1.43Ba	5.14±0.21Aa	10.65±1.83Aa
		5~10	30.77±1.36Aa	66.48±1.20Aa	2.76±0.45Aa	11.35±0.82Aa	4.97±0.09Aa	11.48±0.98Aa
		10~15	30.25±0.86Aa	66.94±0.76Aa	2.81±0.15Aa	14.66±1.59Aa	5.01±0.22Aa	11.20±2.09Aa
		15~20	29.64±0.69Ab	67.71±0.59Aa	2.65±0.27Aab	13.43±1.27Aa	4.91±0.20Aa	12.34±1.69Aa
1.35	1	0~5	30.75±0.69Aa	66.61±0.71Aa	2.64±0.05Aa	8.45±1.16Ab	4.91±0.15Aa	11.96±0.98Aa
		5~10	31.80±1.72Aa	65.70±1.65Aa	2.51±0.10Aa	4.93±1.28Ab	4.89±0.13Aa	11.82±0.82ABa
		10~15	30.25±1.30Aa	67.20±1.02Aa	2.55±0.30Aab	7.60±1.00Ac	5.10±0.13Aa	10.65±1.08Aa
		15~20	28.87±2.67Aa	68.36±2.66Aa	2.78±0.29Aab	7.76±1.25Ac	5.01±0.17Aa	11.73±1.00Aa
	1.5	0~5	32.66±1.49Aa	64.97±1.74Aa	2.37±0.27Ba	10.50±1.29Ab	4.96±0.08Aa	10.95±0.87Aa
		5~10	31.40±1.89Aa	65.52±1.63Aa	3.08±0.70Aa	12.19±1.33Aa	4.95±0.23Aa	11.27±1.23Aa
		10~15	31.08±1.21Aa	66.51±1.23Aa	2.42±0.15Ab	9.95±1.04Ab	4.94±0.14Aa	11.72±0.76Aa
		15~20	30.67±1.42Aa	66.91±1.45Aa	2.41±0.10Bb	10.53±1.54Ab	5.01±0.16Aa	11.13±0.83Aa
	2	0~5	30.66±2.09ABa	66.81±2.21ABa	2.53±0.22Aa	17.45±1.33ABa	4.87±0.20Ba	12.35±1.27Aa
		5~10	30.73±2.68Aa	66.36±2.87Aa	2.91±0.47Aa	11.29±1.31Aa	4.99±0.17Aa	11.25±0.98Aa
		10~15	30.47±0.65Aa	66.54±0.90Aa	2.99±0.45Aa	14.87±1.33Aa	4.89±0.24Aa	12.10±1.68Aa
		15~20	29.63±0.82Aa	67.23±0.76Aa	3.14±0.59Aa	15.65±0.95Aa	4.89±0.19Aa	12.35±1.35Aa
1.40	1	0~5	31.33±1.15Aa	66.31±0.97Aa	2.36±0.23Aa	9.77±1.36Ab	5.05±0.14Aa	10.80±1.25Aa
		5~10	32.97±3.57Aa	64.28±3.49Aa	2.74±0.45Aa	6.34±1.11Ab	5.00±0.18Aa	10.38±0.78Aa
		10~15	31.27±1.15Aa	66.23±1.25Aa	2.50±0.29Aa	6.97±0.85Ac	4.93±0.15Aa	11.63±1.21Aa
		15~20	30.24±0.86Aa	67.23±0.83Aa	2.53±0.04Aa	6.67±1.06Ab	5.00±0.31Aa	11.42±2.74Aa
	1.5	0~5	31.48±1.25Aa	65.89±1.23Aa	2.63±0.20ABa	11.17±1.62Ab	4.95±0.07Aa	11.42±0.67Aa
		5~10	30.79±1.49Aa	66.60±1.30Aa	2.61±0.22Aa	11.78±0.70Aa	4.88±0.20Aa	11.60±0.98Aa
		10~15	31.36±0.96Aa	65.94±1.27Aa	2.70±0.33Aa	11.21±0.97Ab	4.84±0.18Aa	12.30±1.24Aa
		15~20	31.37±1.60Aa	65.91±1.61Aa	2.72±0.15Aa	11.33±2.48Aa	4.91±0.09Aa	11.73±0.56Aa
	2	0~5	32.43±2.27Aa	65.08±2.36Ba	2.49±0.19Aa	18.45±1.30Aa	4.90±0.07ABa	11.45±0.77Aa
		5~10	33.41±2.39Aa	63.85±2.40Aa	2.74±0.22Aa	12.39±1.24Aa	4.84±0.17Aa	11.51±1.31Aa
		10~15	30.40±1.37Aa	67.04±1.51Aa	2.55±0.26Aa	15.52±0.79Aa	4.91±0.16Aa	12.09±0.80Aa
		15~20	31.09±2.44Aa	66.35±2.17Aa	2.56±2.14Aa	14.51±1.36Aa	5.15±0.30Aa	9.76±2.37Aa

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据中不同大写字母表示同一灌水轮次内相同麦壳添加量下不同压实度处理间的差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一灌水轮次内相同压实度下不同麦壳添加量处理间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

表 2 4 轮干湿循环后压实度与麦壳添加量对土壤机械组成、麦壳质量、有机碳及可蚀性因子的影响

Table 2 Effects of compaction degree and wheat husk addition on soil mechanical composition, wheat husk content, organic carbon content, and erodibility factor after four dry-wet cycles

压实度/ (g·cm ⁻³)	麦壳添 加量/%	土层深 度/cm	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	麦壳含量/g	可蚀性因子/ (10 ² t·hm ² ·h·MJ ⁻¹ · mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	SOC/ (g·kg ⁻¹)
1.30	1	0~5	31.01±0.92Ba	66.84±0.79Aa	2.14±0.14Aa	9.07±1.19Ac	4.98±0.05Aab	11.52±0.39ABa
		5~10	30.78±0.87Aa	66.93±0.66Aa	2.30±0.23Aa	4.72±0.84Ab	4.89±0.07Bb	12.21±0.55Aa
		10~15	30.27±0.33Aa	67.33±0.29Aa	2.39±0.07Ba	7.25±1.55Ab	5.00±0.04Aab	11.49±0.34Aa
		15~20	30.22±0.23Ba	67.31±0.25Aa	2.48±0.14Aa	7.00±0.90Ab	5.03±0.09Aa	11.25±0.74Aa
	1.5	0~5	30.15±0.74Ba	67.42±0.65Aa	2.43±0.15Aa	13.42±1.36Ab	5.07±0.10Aa	11.03±0.84Aa
		5~10	30.68±0.32Aa	66.91±0.32Aa	2.41±0.07Ba	8.17±1.18Ab	5.09±0.13Aa	10.60±1.21Bb
		10~15	30.72±0.20Aa	66.85±0.19Aa	2.43±0.16Aa	10.37±1.11Aab	5.15±0.13Aa	10.09±1.22Bb
		15~20	30.36±0.78Aa	67.18±0.58Aa	2.46±0.20Aa	11.08±0.98Aa	5.10±0.15Aa	10.65±1.11Aa
	2	0~5	31.19±1.14Aa	66.60±0.87Aa	2.21±0.29Aa	16.89±1.31Aa	4.95±0.05Bb	11.65±0.44Aa
		5~10	31.02±0.39Aa	66.71±0.40Aa	2.28±0.03Ba	15.29±3.36Aa	5.04±0.17Aab	10.99±1.30Aab
		10~15	30.87±1.34Aa	66.69±1.33Aa	2.44±0.14ABa	11.22±2.71Ba	4.97±0.15Ab	11.54±0.82Aa
		15~20	30.01±0.76Aa	67.41±0.71Aa	2.58±0.21Aa	12.05±2.89Aa	5.11±0.22Aa	10.64±1.57Ba
1.35	1	0~5	32.41±0.93Aa	65.35±0.94Bb	2.24±0.04Ab	10.29±1.29Ab	4.83±0.06Bb	12.10±0.53Aa
		5~10	30.54±0.72Aa	67.04±0.78Aa	2.42±0.13Ab	5.03±1.04Ac	5.16±0.19Aa	10.08±1.53Ba
		10~15	29.98±0.49Aa	67.52±0.44Aa	2.50±0.08Aa	6.73±1.07Ac	5.07±0.04Aa	11.03±0.29Aa
		15~20	30.62±0.84ABa	66.90±0.78ABa	2.48±0.13Aa	6.34±1.19Ac	5.05±0.05Aa	11.01±0.50Ab
	1.5	0~5	30.87±0.74ABb	66.83±0.67ABa	2.30±0.14ABb	12.61±1.02Ab	4.96±0.06Ab	11.68±0.37Aa
		5~10	30.63±0.78Aa	66.94±0.68Aa	2.43±0.13Bb	8.01±1.34Ab	5.05±0.18Aa	10.95±1.36ABa
		10~15	30.21±0.72Aa	67.38±0.60Aa	2.40±0.17Aa	11.68±1.22Ab	4.99±0.12Ba	11.60±0.82Aa
		15~20	30.36±0.57Aa	67.15±0.56Aa	2.49±0.06Aa	10.65±1.11Ab	4.93±0.12Aab	11.95±0.98Aab
	2	0~5	30.59±0.52Ab	66.96±0.46Aa	2.45±0.09Aa	18.39±1.67Aa	5.20±0.16Aa	9.71±1.52Bb
		5~10	30.75±0.49Aa	66.64±0.60Aa	2.61±0.11Aa	10.93±1.49Aa	5.13±0.16Aa	10.21±1.12Aa
		10~15	30.47±0.88Aa	67.01±0.93Aa	2.52±0.09Aa	15.64±1.33Aa	4.97±0.09Aa	11.60±0.53Aa
		15~20	30.52±0.56Aa	67.04±0.57Aa	2.44±0.08Aa	14.22±2.07Aa	4.92±0.06ABb	12.06±0.52ABa
1.40	1	0~5	31.51±0.53ABa	66.32±0.60ABa	2.17±0.21Aa	10.94±1.05Aa	5.01±0.10Aa	11.09±0.87Ba
		5~10	30.34±0.44Ab	67.33±0.35Aa	2.33±0.11Ab	5.19±1.53Ab	5.05±0.06ABa	11.13±0.41ABa
		10~15	29.95±0.45Ab	67.53±0.44Aa	2.52±0.06Aa	7.75±1.14Ac	4.98±0.16Aa	11.74±1.17Aa
		15~20	31.46±0.77Aa	66.17±0.64Bb	2.37±0.20Aa	6.39±1.80Ab	5.00±0.03Aa	11.13±0.32Ab
	1.5	0~5	31.72±0.88Aa	66.13±0.76Ba	2.14±0.19Ba	14.00±0.82Aa	5.09±0.24Aa	10.19±2.00Aa
		5~10	30.34±0.32Ab	67.10±0.25Aa	2.57±0.09Aa	8.20±1.86Ab	4.90±0.07Aa	12.22±0.59Aa
		10~15	30.61±0.56Aa	66.93±0.53Aa	2.45±0.07Aa	11.04±1.01Ab	4.97±0.03Ba	11.59±0.38Aa
		15~20	30.09±0.68Ab	67.36±0.62Aa	2.55±0.11Aa	12.71±1.49Aa	5.02±0.11Aa	11.37±1.02Ab
	2	0~5	31.08±1.03Aa	66.66±0.97Aa	2.26±0.08Aa	14.44±2.83Aa	5.02±0.19ABa	11.11±1.35ABa
		5~10	31.15±0.51Aa	66.55±0.42Ab	2.30±0.09Bb	14.34±1.87Aa	4.95±0.19Aa	11.64±1.34Aa
		10~15	30.65±0.27Aa	67.00±0.23Aa	2.35±0.06Bb	17.19±1.45Aa	5.07±0.15Aa	10.86±1.22Aa
		15~20	30.36±0.25Ab	67.18±0.16Aa	2.46±0.13Aa	14.51±0.41Aa	4.85±0.12Bb	12.59±1.00Aa

表 3 不同处理因素与土壤各项指标的三因素方差分析

Table 3 Three-way ANOVA of effects of different treatment factors on different soil indicators

处理	砂粒	粉粒	黏粒	麦壳	可蚀性因子 (K _{EPIIC})	SOC
B	**	*	*	ns	ns	ns
H	ns	ns	ns	**	ns	ns
C	ns	**	**	ns	**	*
B×H	ns	ns	*	ns	ns	ns
B×C	ns	ns	ns	ns	ns	ns
H×C	ns	ns	ns	ns	ns	ns
B×H×C	ns	ns	ns	ns	ns	ns

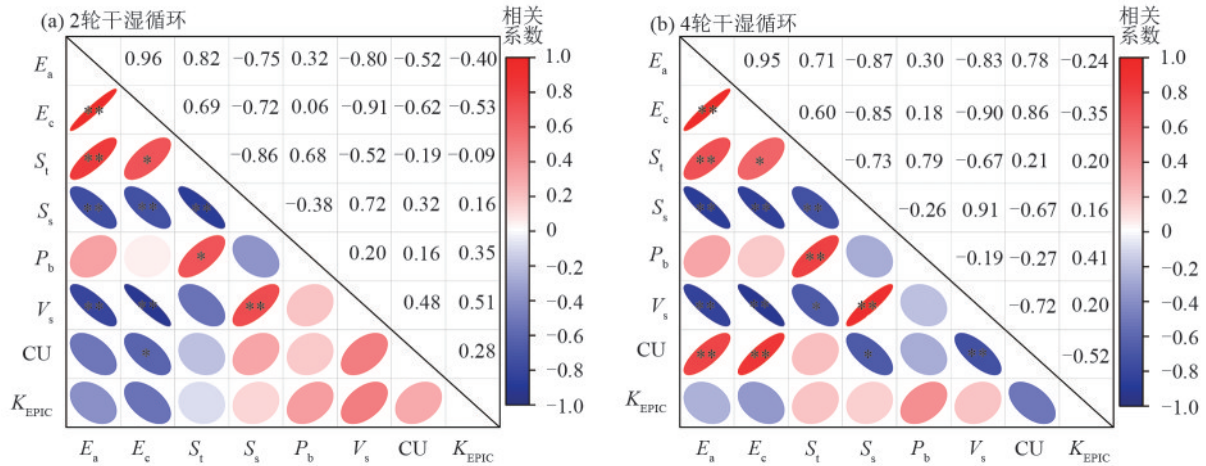
注:表中B为土壤初始压实度;H为麦壳添加量;C为干湿循环轮次;*表示在p<0.05水平上显著相关,**表示在p<0.01水平上显著相关;ns表示相关性不显著。

2.5 相关性分析

为深入探究麦壳添加对滩涂盐渍土的改良机制,采用Pearson相关分析方法,系统分析蒸发速率(E_a)、盐分淋洗量(S_l)、土壤收缩量(V_s)等关键参数间的相互作用,以明确土壤水盐运移特征及结构稳定性指标的内在联系,揭示干湿循环轮次对土壤结构演变的影响。2轮干湿循环后(图7a),土壤平均蒸发速率与累计蒸发量和淋洗盐分呈极显著正相关,与总体含盐量及土体收缩量呈极显著负相关(p<0.01);累计蒸发量与淋洗盐分呈显著正相关(p<0.05),与总体含盐量、土体收缩量及麦壳均匀性系数呈显著负相关;淋洗盐分与总体含盐量呈极显著负相关,与干体质量呈显著正相关;总体含盐量

与土体收缩量呈极显著正相关。在 4 轮干湿循环后(图 7b),平均蒸发速率、累计蒸发量与麦壳均匀性系数由负相关变为显著正相关;淋洗盐分与土体收缩

量由不显著负相关转为显著负相关;总体含盐量、土体收缩量均与麦壳均匀性系数由不显著正相关转为显著负相关。



注:图中 E_a 为平均蒸发速率; E_c 为累计蒸发量; S_t 为总淋洗盐分量; S_s 为土柱总体含盐量; ρ_b 为土体的总干体积质量; V_s 为土柱总体收缩量;CU为土柱内麦壳分布的均匀性系数; K_{EPIC} 为土壤可蚀性因子;*表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关,**表示在 $p < 0.01$ 水平上显著相关。

图 7 土壤水分蒸发、盐分运移、麦壳分布、土体结构及可蚀性因子间的相关性

Fig. 7 Correlations between soil water evaporation, salt transport, wheat husk distribution, soil structure and soil erodibility factor

3 讨论

3.1 干湿循环下麦壳添加对滩涂盐渍土水盐运移的影响

在外部环境、土壤水势、孔隙内水汽传导等因素的影响下,灌水后土壤的蒸发速率变化通常分为初期速率较高的稳定蒸发阶段、中期速率下降阶段及后期缓慢蒸发阶段^[28]。本研究由于灌水后等待入渗水向储水底座充分渗漏,并配合使用红外射灯加热土表,使得各处理初期稳定蒸发阶段未明显呈现,蒸发过程主要分为土壤水势主导的速率下降阶段和水汽扩散主导的缓慢蒸发阶段(图 3)。相比于无麦壳的处理,麦壳添加对上述 2 类阶段的蒸发速率均有不同程度的提升。一方面是由于麦壳添加提升土壤孔隙度及饱和水分质量分数,使得相同蒸发历时下土壤的水吸力更低,单位时段的蒸发量更大,该趋势与王珍等^[12]针对秸秆粉碎还田后土壤水分蒸发特征的研究结论一致。在水汽扩散阶段,蒸发速率的提升可能是由于麦壳的大颗粒属性降低土壤的干缩程度,限制土壤致密结构的形成,维持土体内水汽传输的孔隙联通^[10],使得麦壳添加量越高的处理累积蒸发量越高。多轮干湿循环后水流下渗的楔入效应促使微小的土壤孔隙逐渐转化为较大裂隙^[29],增大土体的受蒸发面积,使得各处理初期的蒸发速率在第 3、4 轮干燥过程中得到提升,而添加麦壳的处理,得益于干缩程度的下降,初期蒸发速率的提升程度较低。

SHAYGAN 等^[30]基于土柱试验得出,在低透水

性的粉壤土中混合木屑将显著提升溶质的深层渗漏,进而提升深层土壤的盐分含量。上述特征在添加麦壳的处理中也有所体现,添加麦壳的 H2 和 H3 处理在 10~15、15~20 cm 深度的土层内盐分质量分数略高于无麦壳的处理,但表层(0~5 cm)含盐量却低于无麦壳的处理(图 5a)。结合土壤蒸发状况,虽然麦壳添加提升土体水分的蒸发程度,但通过促进淋洗过程中土壤盐分的下渗,限制干燥后土壤盐分的表聚。麦壳带来的大孔隙结构可作用于蒸发后期的水汽蒸发阶段,而水汽主导的水分运移对溶质的迁移程度有限^[31],最终使得部分麦壳添加量较高的处理在底层 15~20 cm 土层的范围内土壤的盐分含量反而最高。在本研究中,压实度越高的处理在土柱填充时所需的土样越多,柱内初始的含盐总量也越高,使得在第 1、2 轮灌水后,各类麦壳添加量的处理下,淋洗的盐分随压实度增大而显著增加。土壤体积质量的增加将限制淋洗过程中土体内溶质的运移^[32],且干燥过程将加剧土壤的固结程度^[33],导致滞留在表层的溶质运移进一步受限。本研究发现,压实度较高的 B3 处理在 4 轮循环后,0~5 cm 土层范围内的含盐量高于 2 轮循环的处理,但添加麦壳的处理盐分积聚程度低于无麦壳的处理(图 5b),说明添加麦壳能在一定程度上缓解干湿循环后体积质量增加对盐分运移的限制作用。

3.2 干湿循环下麦壳添加对土体结构及土壤颗粒运移的影响

作物秸秆还田后影响土壤收缩程度的因素有很

多,但秸秆的还田量及还田后土壤的湿体积质量是决定土壤失水后土壤开裂及收缩程度的关键因素^[34]。本研究中,麦壳添加量越高的处理,土壤失水后收缩量也越低(图6),该结果与张展羽等^[35]关于土壤-秸秆混合密度对干缩裂缝的影响特征相似,随秸秆混合密度增大,土体内裂缝面积密度和裂缝平均宽度随之下降,干缩作用对土体的形态变化得到抑制。土壤失水后的干体积质量取决于初始的压实度,且在高压实度的B3处理下,增加干湿循环并不能够显著增大土壤的收缩量及干体积质量,主要原因是土壤压实度的增加降低土体内初始的孔隙度,失水时可收缩的内部空间有限^[36],使得干湿循环对土壤裂隙的累加效应减弱。

在干燥失水过程中,当随水分降低而增加的基质吸力超过土体抗拉强度时,土体出现开裂,结构发生破坏。而在复湿过程中,随水分增加非水稳定性团聚体裂解,颗粒随水分运移而发生重组^[37]。本研究中随干湿循环轮次的增加,土壤中粉粒占比轻微下降,黏粒占比略微提升,随之造成土壤可蚀性的增大。干湿循环轮次同样对土壤有机碳产生显著影响,且随干湿轮次增加土壤的有机碳相应增多,原因主要是麦壳中少量结构简单的可溶性糖类与蛋白质,在湿热的土壤中优先腐解^[38],并随试验历时的增加而释放的含碳有机物同步增加。然而,添加麦壳对土壤可蚀性未产生显著影响,原因可能是频繁的干湿交替过程不利于微生物稳定生长,降低麦壳在土壤中的分解速率。同时,麦壳本身所含多糖和蛋白质等易分解物质占比较茎、叶等部位偏低,且试验持续时间较短,致使短期内有机碳释放量有限,从而对土壤抗侵蚀性的影响程度较小。

值得注意的是,本研究采用透水土工布作为土体底部垫层,但在渗流作用下土壤中粉粒及黏粒将逐渐迁移并积聚至致密的土工布表面,形成低透水度的“滤饼”层,且该“滤饼”持续吸纳更多的小颗粒而逐渐增厚^[39],此现象可能是导致底部15~20 cm土层的土壤颗粒分布在部分处理中出现显著差异的主要原因。在后续的研究中,应将麦壳还田引入实际的大田情景,探究在自然气候下的还田效果,并进一步深入探究田间尺度下裂缝的空间分布状况,从而更细致地解释干湿循环下颗粒的重组过程。本研究发现,分布在裂隙处的麦壳,由于其多孔隙、低密度的性质,灌水湿润时出现起浮上移,使得干湿循环后0~5 cm土层出现麦壳聚集而5~10 cm土层的麦壳下降(表3),进而降低麦壳在土体内的分布均匀度,且干湿轮次的增多加剧均匀度的降低,使得2轮干湿

后的麦壳分布均匀度与土壤平均蒸发量和收缩量由无显著相关性变为4轮干湿后的显著正相关与显著负相关(图7)。因此,存在动态分布的麦壳,其改土效益也在动态变化,长期的跟踪监测有待进一步延续,更有必要对麦壳的腐解过程进行连续对比分析,进而揭示麦壳在生化层面的改土机制。

4 结论

1)添加麦壳的土壤平均蒸发速率及累计蒸发量显著高于无麦壳处理,但不同麦壳添加量间的差异程度不高。增大压实度将提升土壤的累计蒸发量,且对低麦壳添加量处理的提升程度更大。随干湿轮次增加,土壤初期的蒸发速率将从第1轮的1.9 mm/h增加至第4轮的2.3 mm/h,累计蒸发量相应提升7.4%。

2)灌水阶段,土壤盐分淋洗量随麦壳添加量的增大而提升,且土壤压实度越高增幅越大。蒸发阶段,添加麦壳能够抑制盐分在土体表层(0~5 cm)的积聚,且对返盐的抑制程度随干湿循环轮次增加而提升。

3)添加麦壳可显著减少土体的收缩量,进而限制土体干体积质量的增大,但该效果随土壤压实度的提升而减弱。在压实度相对较低的B1(1.30 g/cm³)和B2(1.35 g/cm³)处理下,增加干湿循环次数将提升土壤的收缩量并增大土壤体积质量。

4)与2轮干湿循环相比,4轮干湿循环后土壤中粉粒(0.002~0.05 mm)占比下降0.5%而黏粒(<0.002 mm)占比上升0.3%,有机碳同比增加2.7%,土壤的可蚀性因子提高1.3%。添加麦壳对土壤可蚀性因子未造成显著影响,但在4轮干湿循环后,垂向的麦壳分布均匀性系数与土壤蒸发速率和累计蒸发量呈显著正相关,而与土壤含盐量和收缩量呈显著负相关。

参考文献:

- [1] 阙博颖,方斌,许实.基于ESDA的我国耕地后备资源集聚特征的比较研究[J].南京师大学报(自然科学版),2017,40(1):112-119.
KAN B Y, FANG B, XU S. Comparative research on the agglomerative characteristics of cultivated land reserve resources[J].Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition),2017,40(1):112-119.
- [2] SUN X Q, SHE D L, FEI Y H, et al. An improved pore-solid fractal model for predicting coastal saline soil hydraulic properties based on changepoints determined by genetic algorithm-support vector regression[J].Soil and Tillage Research,2022,224:e105502.
- [3] MAO Q, GUO K, ZHANG J W, et al. Response of granite residual soil slopes under dry-wet cycles[J].Frontiers in Earth Science,2024,11:e1333668.

- [4] YANG H J, XIA J B, XIE W J, et al. Effects of straw returning and nitrogen addition on soil quality of a coastal saline soil: A field study of four consecutive wheat-maize cycles[J]. *Land Degradation and Development*, 2023, 34(7):2061-2072.
- [5] WANG J P, HUANG J C, HOU X Y, et al. Inorganic improver and straw returning promote corn growth and improve the quality of saline soils [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2025, 71(3):232-247.
- [6] 段正宇,朱成立,车子刚,等. 秸秆还田下土壤孔隙演化及其对溶质穿透特征的影响机理分析[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(4):312-326.
- DUAN Z Y, ZHU C L, CHE Z G, et al. Soil pore evolution and effect on solute transport with straw application [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(4):312-326.
- [7] LU P R, ZHANG Z Y, SHENG Z P, et al. Effect of surface straw incorporation rate on water-salt balance and maize yield in soil subject to secondary salinization with brackish water irrigation[J]. *Agronomy*, 2019, 9(7):e341.
- [8] EBRAHIM YAHYA K, JIA Z H, LUO W, et al. Enhancing salt leaching efficiency of saline-sodic coastal soil by rice straw and gypsum amendments in Jiangsu coastal area[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2022, 13(5):e101721.
- [9] 陈晓东,吴景贵,范围,等. 有机物料对原生盐碱土微团聚体特征及稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2):201-207.
- CHEN X D, WU J G, FAN W, et al. Effect of organic materials on the characteristics and stability of micro-aggregates in the native saline-alkali soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2):201-207.
- [10] WANG C, ZHANG Z Y, FAN S M, et al. Effects of straw incorporation on desiccation cracking patterns and horizontal flow in cracked clay loam [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 182:130-143.
- [11] 杨振北,胡东旭,汪时机. 膨胀土胀缩裂隙演化及其扰动规律分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17):169-177.
- YANG Z B, HU D X, WANG S J. Evolution law of expansion-shrinkage crack and its disturbance rule of expansive soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(17):169-177.
- [12] 王珍,冯浩,吴淑芳. 秸秆不同还田方式对土壤低吸力段持水能力及蒸发特性的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(3):533-539.
- WANG Z, FENG H, WU S F. Effect of different straw-incorporation methods on soil water retention capacity and evaporation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(3):533-539.
- [13] 郭金金,方怒放,刘前进,等. 小麦秸秆粉碎还田配施氮肥与多酚对土壤侵蚀阻力的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4):122-128.
- GUO J J, FANG N F, LIU Q J, et al. Effects of incorporated wheat straw returning combined application with nitrogen and polyphenols on soil erosion resistance [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4):122-128.
- [14] BLEDKI A K, MAMUN A A, VOLK J. Physical, chemical and surface properties of wheat husk, rye husk and soft wood and their polypropylene composites [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(4):480-488.
- [15] 郭晓琳,邢鹏飞. 稻壳在化工领域的应用研究进展[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(9):218-221.
- GUO X L, XING P F. Research progress of rice husk on application in chemical industry [J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(9):218-221.
- [16] 邢旭光,柳焯,马孝义. 土壤添加物对土-水曲线和土体收缩的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(1):40-48.
- XING X G, LIU Y, MA X Y. Effects of soil additive on soil-water characteristic curve and soil shrinkage [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(1):40-48.
- [17] 赵丽丽,李陆生,蔡焕杰,等. 有机物料还田对土壤导水导气性的综合影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(6):1045-1057.
- ZHAO L L, LI L S, CAI H J, et al. Comprehensive effects of organic materials incorporation on soil hydraulic conductivity and air permeability [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(6):1045-1057.
- [18] BALDIN C R B, KAWANAMI M Y, COSTA W G S, et al. Mechanical properties of a clay soil reinforced with rice husk under drained and undrained conditions [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(10):2676-2686.
- [19] 王秋菊,焦峰,刘峰,等. 稻壳深施对苏打碱土盐分运移特征的影响[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(4):86-89.
- WANG Q J, JIAO F, LIU F, et al. Effect of deep application rice husk on salt transport characteristics in soda alkali soil [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(4):86-89.
- [20] 耿辉,朱彧,王志强,等. 酸雨石等5种常用吸盐材料的盐碱土壤改良效果研究[J]. *世界地质*, 2018, 37(3):967-975.
- GENG H, ZHU Y, WANG Z Q, et al. Effects of five kinds of salt-absorbing materials represented by acid rain stone on saline-alkaline soil improvement [J]. *World Geology*, 2018, 37(3):967-975.
- [21] 万安娜,韩其飞,李超凡,等. 江苏滨海盐沼湿地碳动态时空差异及其对气候变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(11):3433-3442.

- WAN A N, HAN Q F, LI C F, et al. Spatial-temporal variations of carbon dynamics and their responses to climate change in Jiangsu coastal salt marshes[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(11): 3433-3442.
- [22] 张海晶, 王少杰, 田春杰, 等. 玉米秸秆及其生物炭对东北黑土溶解有机质特性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 243-250.
- ZHANG H J, WANG S J, TIAN C J, et al. Effects of maize straw and its biochar on the dissolved organic matter characteristics of black soil in northeastern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 243-250.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 42-50.
- BAO S D. Soil agricultural chemistry analysis [M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 42-50.
- [24] VAN SOEST P J. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin[J]. Journal of Aoac International, 1990, 73(4): 491-497.
- [25] WILLIAMS J R, ARNOLD J G. A system of erosion: Sediment yield models[J]. Soil Technology, 1997, 11(1): 43-55.
- [26] 王亚娟, 陈云明, 孙亚荣, 等. 宁南山区侵蚀沟不同部位土壤理化性质及可蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2): 11-18.
- WANG Y J, CHEN Y M, SUN Y R, et al. Study on physical and chemical properties and erodibility of soil in different parts of erosion gully in the mountainous area of south Ningxia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 11-18.
- [27] Christiansen J E. Irrigation by sprinkling [J]. California Agriculture Experiment Station Bulletin, 1972.
- [28] 李艳, 刘海军, 黄冠华. 麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 98-106.
- LI Y, LIU H J, HUANG G H. Modeling resistance of soil evaporation and soil evaporation under straw mulching [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 98-106.
- [29] FENG H X, XING X G, SU L C, et al. Insights into saline soil cracking subjected to drying-wetting cycles[J]. Acta Geophysica, 2025, 73(1): 619-633.
- [30] SHAYGAN M, BAUMGARTL T, ARNOLD S, et al. The effect of soil physical amendments on reclamation of a saline-sodic soil: Simulation of salt leaching using HYDRUS-1D[J]. Soil Research, 2018, 56(8): 829-845.
- [31] 袁剑舫. 土壤水分的蒸发及其影响因素[J]. 土壤学报, 1964, 1(4): 474-481.
- YUAN J F. Evaporation of soil moisture and its influencing factors [J]. Acta Pedologica Sinica, 1964, 1(4): 474-481.
- [32] 李志明, 周清, 王辉, 等. 土壤容重对红壤水分溶质运移特征影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 101-103.
- LI Z M, ZHOU Q, WANG H, et al. Influence of bulk density on the characteristic of water solute transport in red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 101-103.
- [33] PAN L M, CHEN Y Y, XU Y, et al. A model for soil moisture content prediction based on the change in ultrasonic velocity and bulk density of tillage soil under alternating drying and wetting conditions [J]. Measurement, 2022, 189: e110504.
- [34] 董建新, 丛萍, 刘娜, 等. 秸秆深还对黑土亚耕层土壤物理性状及团聚体分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 921-934.
- DONG J X, CONG P, LIU N, et al. Effects of deep straw incorporation on subsoil physical properties and aggregate distribution in black soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 921-934.
- [35] 张展羽, 范世敏, 王策, 等. 干缩开裂黄褐土非饱和水平吸渗特征研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 214-221.
- ZHANG Z Y, FAN S M, WANG C, et al. Characteristics of unsaturated horizontal infiltration in desiccation cracks yellow cinnamon soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 214-221.
- [36] 邢旭光, 马孝义. 土壤失水过程对土体收缩特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 148-153.
- XING X G, MA X Y. Effects of soil drying process on soil shrinkage characteristic [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 148-153.
- [37] 冯浩轩, 李敏, 行嘉豪, 等. 盐分及干湿循环对壤土蒸发特性与裂隙发育影响的机理探究[J]. 农业工程学报, 2025, 41(11): 124-135.
- FENG H X, LI M, XING J H, et al. Mechanism explorations of salt and drying-wetting cycle affecting evaporation and crack development of loam soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(11): 124-135.
- [38] SRUTHY K S, PURANIK S, KUMAR V, et al. Recent developments in microbial degradation of crop residues: A comprehensive review [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2025, 22(7): 6247-6264.
- [39] 张迎奥, 王少丽, 郝瑞霞, 等. 基于两种土质的暗管土工布外包料反滤效果对比试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 270-276.
- ZHANG Y A, WANG S L, HAO R X, et al. Comparative test on the anti-filtration effect of geotextile envelope material around subsurface drainage pipe using two kinds of soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(2): 270-276.