

暗管条件下牧草种植对农牧交错区盐渍土的改土效应

鄂继芳^{1,2} 杨树青¹ 张万锋³ 张晶² 郑彦¹ 胡玲玲²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古恒源水利工程有限公司, 呼和浩特 010010;
3. 内蒙古师范大学旅游学院, 呼和浩特 010022)

摘要: 为探究农牧交错区暗管条件下种植耐盐牧草对改良盐渍土的效应, 在河套灌区红卫试验基地开展为期2年的种植不同牧草田间试验。试验设置暗管条件下种植苜蓿(TM)、甜高粱(TB)、苏丹草(TS)和无牧草(T), 以空白地为对照(CK), 共5种处理。结果表明, 2年种植苜蓿(TM处理)0~60 cm土层平均容重最小, 为1.416 g/cm³, 较CK下降9.4% ($P < 0.05$); 相比如对照处理, 暗管条件下种植牧草可显著提高盐渍土壤孔隙度, 增幅为10.3%~24.3% ($P < 0.05$), 2年试验后苜蓿孔隙度最高, 为51.6%; 各处理土壤有机质(SOM)含量随土层深度增加而减少, T处理0~60 cm土层有机质流失严重, 2年试验期平均降低20.3% ($P < 0.05$), 而暗管+牧草处理可有效缓解SOM流失, TM处理效果较佳, 2年SOM含量平均提高5.0% ($P < 0.05$)。2021年暗管条件下牧草鲜质量较2020年提高24.6%~49.2% ($P < 0.05$), TM处理增产效果最大, 为49.2%。综上, 暗管条件下种植苜蓿改良盐渍土壤效果较佳, 可实现河套灌区盐渍土结构改善与SOM含量提高, 达到提高牧草产量的目标, 可为农牧交错区实施暗管工程+生物改良盐渍土提供理论基础与技术支持。

关键词: 农牧交错区; 暗管; 牧草种植; 盐渍土; 改土效应

中图分类号: S274

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0402-09

OSID:



Effect of Forage Planting on Improvement of Saline Soil under Subsurface Pipe in Agro-pastoral Intertwined Zones

E Jifang^{1,2} YANG Shuqing¹ ZHANG Wanfeng³ ZHANG Jing² ZHENG Yan¹ HU Lingling²

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

2. Inner Mongolia Hengyuan Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Hohhot 010010, China

3. Tourism College, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: To explore the effects of planting salt-tolerant forage grass varieties on improving saline soil under the subsurface pipe in agro-pastoral intertwined zones, field experiments were carried out in Hongwei Experimental Base of Hetao Irrigation District in 2020 and 2021. The experiment consisted of five different treatments. It included *Medicago sativa* (TM treatment), *Sorghum bicolor* (TB treatment), *Sorghum sudanense* (TS treatment) and vacant land (T treatment), and the blank plot as the control (CK treatment). The results showed that the average bulk density of TM treatment was 1.416 g/cm³ in 0~60 cm soil layer in two years, which was decreased by 9.4% compared with that of CK treatment ($P < 0.05$). It improved the salinity soil porosity under subsurface pipe for planting the three kinds of forage grass. The average porosity of 0~60 cm soil layer was increased by 10.3%~24.3% ($P < 0.05$). And *Medicago sativa* treatment was the highest, 51.6%, after two years of experiment. The content of soil organic matter (SOM) in each treatment was gradually decreased with the increase of soil depth. The loss of organic matter in 0~60 cm soil layer treated by tube T alone was serious, and the average loss in two years was reduced by 20.3% ($P < 0.05$). However, planting forage grass under subsurface pipe could effectively alleviate the loss of SOM. The treatment effect of *Medicago sativa* (TM

收稿日期: 2023-12-17 修回日期: 2024-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52069023, 52179037)、内蒙古自然科学基金项目(2023QN05010)和中央引导地方科技发展资金项目(2022ZY0139)

作者简介: 鄂继芳(1983—), 女, 博士生, 内蒙古恒源水利工程有限公司工程师, 主要从事农业水土资源利用研究, E-mail: esan2007@163.com

通信作者: 杨树青(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源利用与水土环境调控研究, E-mail: nmndysq@126.com

treatment) was better, and the average organic matter content in soil layer was increased by 5.0% ($P < 0.05$). The biomass fresh weight of three forage species under subsurface pipe was increased by 24.6% ~ 49.2% in 2021 compared with that in 2020 ($P < 0.05$). *Medicago sativa* had better effect on increasing fresh production. In conclusion, it had better effect on improving the saline soil under subsurface pipe for planting *Medicago sativa* (TM treatment). It improved the physical and chemical properties of saline soil and increased the content of SOM. It also achieved the objective of improving forage yield. The research result can provide theoretical basis and technical support for the implementation of subsurface pipe project and biological improvement of saline soil in Hetao Irrigation District.

Key words: agro-pastoral intertwined zones; subsurface pipe; forage planting; saline soils; effect of soil improvement

0 引言

土壤盐渍化严重影响农业生态系统的健康循环,我国约有 3.6×10^7 hm^2 土地受盐渍化影响,制约着农业生产力的提高^[1]。内蒙古河套灌区是我国重要产粮区,约 70% 耕地存在不同程度盐渍化,乌拉特前旗地处灌区下游,是典型的农牧交错区,降水少,蒸发强,土壤质地差,田间排水不畅,土壤次生盐渍化严重^[2-3]。灌排不合理是灌区土壤盐渍化的主要原因,改良措施应以土壤脱盐动力的水利措施为基础^[4],遵循“从水入手、水利先行”的原则^[5],完善灌排系统,借助井沟渠等配套措施,达到灌溉适宜、排水及时的目的^[6],众多措施中暗管排水技术是十分有效的工程措施。利用淡水淋溶土壤盐分进入暗管中,汇入排水沟内,最后集中排出,以调控土壤水盐平衡^[7],降低土壤含盐量,提高水分利用效率,提高作物产量^[8],为植物根层提供适宜的生长环境,有利于作物根系向下深扎,促进作物吸收深层土壤养分^[9]。但暗管排水过程中,土壤养分大量流失,且随暗管间距的减小而增大^[10]。同时,农牧交错区因气候干旱、放牧过度导致草场退化,草畜失衡,而种植耐盐牧草不仅对改善当地生态环境有重要意义,且可增加饲草料有效供给^[11]。因此,在农牧交错区开展耐盐牧草种植具有重要的现实意义。通过耐盐牧草的生命活动及根系穿插作用,改善土壤理化性质,积累有机质、减轻土壤板结、提高水分入渗率^[12],调节水盐分布,提高土壤肥力,为后茬作物根区提供良好的水肥盐环境^[13-14]。蔺海明等^[15]发现,种植毛苕子可有效降低 0 ~ 100 cm 土层含盐量,在宁夏银北盐碱地上种植苜蓿可使 0 ~ 20 cm 表层土壤脱盐率达到 31.1%。ASHUTOSH 等^[16]发现,种植细叶桉可有效改善盐碱土物理化学性质,降低土壤密度和孔隙度,显著增加土壤有机碳等养分;在滨海盐渍土种植田菁后,土壤理化性质显著改善,降低土壤容重与 pH 值,提高孔隙度^[17]。

综上,盐渍土改良是一个漫长且复杂的过程,涉及多方面因素,单独措施改良效果有限。目前研究盐渍土单一措施改良的较多,也取得大量成果。本文以暗管排水工程 + 生物改良措施为切入点,研究暗管条件下耐盐牧草生长状况及对盐渍土改土效应的影响,合理利用盐渍地种植牧草,以期提出适宜河套灌区农牧交错区盐渍土改良与适生牧草增产的调控模式,为盐渍土合理开发与水土资源持续利用提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2020 年和 2021 年在内蒙古河套灌区乌拉特前旗红卫试验基地开展 ($40^{\circ}30' \sim 40^{\circ}40' \text{N}$ 、 $108^{\circ}45' \sim 109^{\circ}36' \text{E}$, 海拔 1 029 m), 该试验区处于农牧交错区,属中温带半干旱大陆性气候,年均降雨量 200 mm,年均蒸发量高达 2 383 mm,春季地表返盐严重。试验区土壤类型为粉壤土,0 ~ 20 cm 土层总含盐量高于 5 g/kg,属于中度盐渍化土,0 ~ 60 cm 土层平均容重为 1.532 g/cm^3 ,平均田间持水率为 23.64%,平均 pH 值为 7.73,生育期地下水埋深变幅为 1.45 ~ 1.92 m。供试土壤养分含量(质量比)为:有机质 10.89 g/kg、全氮 0.49 g/kg、全磷 0.63 g/kg、水解氮 20.49 mg/kg、速效磷 11.48 mg/kg、速效钾 186.27 mg/kg。研究期间试验区日降雨量和气温变化如图 1 所示。

1.2 试验设计

根据项目团队研究成果^[9],试验区暗管埋设深度为 0.8 m,间距 20 m,排水暗管外包材料单位面积质量为 68 g/m^2 的透水性土工布,暗管材质为带孔 PVC 波纹管,管径为 80 mm,比降控制在 0.1% 以内。在暗管埋设后的盐渍化耕地上分别种植苜蓿 (*Medicago sativa*, 品种:阿尔冈金, TM 处理)、甜高粱 (*Sorghum bicolor*, 品种:BJ0603, TB 处理) 和苏丹草 (*Sorghum sudanense*, 品种:乌拉特 1 号, TS 处理)

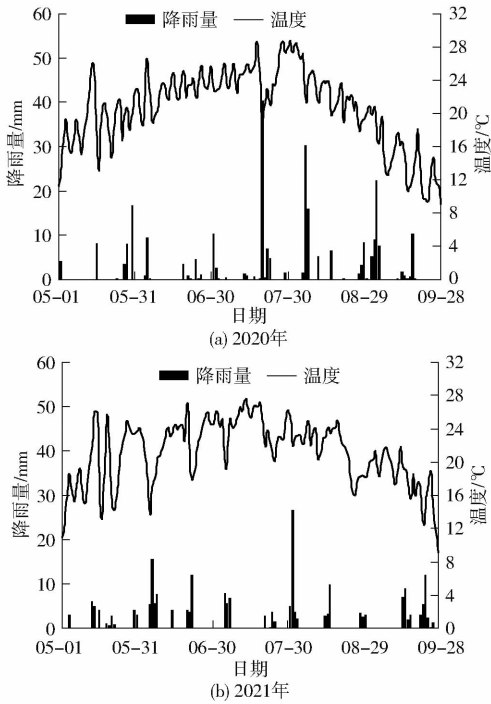


图1 牧草生育期日降雨量和温度

Fig. 1 Daily rainfall and temperature during growing period of forage grass

3种耐盐牧草,不种植耐盐植物(T处理),以空白为对照(CK处理),共5个处理,3次重复,试验方案如表1所示。播种前,各处理覆盖宽60 cm黑色塑料地膜,地膜行间裸露地面间距20 cm,牧草种植采用人工点播,每行地膜播种2行,穴距30 cm,行距20 cm。苜蓿、甜高粱和苏丹草种子穴播粒数分别为15、3、4粒,播种后覆沙。参照当地施肥方法和施肥量:氮肥315 kg/hm²(不同处理均按纯N计算施氮量,氮肥质量分数为46%,施用时需换算成尿素质量)、磷肥180 kg/hm²(以P₂O₅计)、钾肥45 kg/hm²(以K₂O计,换算成氯化钾),50%氮肥与磷肥、钾肥作为基肥一次性施入,剩余氮肥分2次分别在一水、二水前追施,人工除草。在牧草生长旺盛期进行2次灌溉,灌水量均为950 m³/hm²。

1.3 样品采集与测试

(1) 土样测定

播种前、灌水前后与收获后收集各处理土壤样品,用土钻取深60 cm的土壤,每20 cm为一层,共3层。春播前及秋收后(10月)测试土壤容重和土壤孔隙度,土样经风干和粉碎后过1 mm筛,测定有机

表1 试验方案

Tab. 1 Experiment program

处理	暗管参数	牧草种类	肥料用量	灌溉定额
TM	埋深0.8 m,间距20 m	苜蓿	氮肥用量为315 kg/hm ² (不同处理均按纯N计算施氮量,氮肥质量分数为46%,施用时需换算成尿素量)	采用黄河水灌溉,灌溉水矿化度为0.608 g/L;全生育期灌水2次,单次灌水定额为950 m ³ /hm ²
TB	埋深0.8 m,间距20 m	甜高粱	磷肥用量为180 kg/hm ² (以P ₂ O ₅ 计)	
TS	埋深0.8 m,间距20 m	苏丹草	钾肥采用的氯化钾用量为45 kg/hm ² (以K ₂ O计)	
T	埋深0.8 m,间距20 m		50%氮肥与磷肥、钾肥作为基肥一次性施入,剩余氮肥分2次分别在一水、二水前追施	
CK				

质含量。采用环刀法与干燥法测定土壤容重 ρ ,计算式为

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

式中 m ——环刀内干土质量,g

v ——环刀体积,cm³

土样孔隙度由土粒密度和容重计算得出;按照LY/T 1237—1999《森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算》采用重铬酸钾氧化-外加热法测土壤有机质含量。

(2) 牧草样品测定

在牧草苗期(5月)、生长旺盛期(7、8月)和收获期(9月),随机选取测量并记录5株植物株高和叶面积。3种牧草地上和地下部分生物量测定方法如下:①地上部分:选取长势相似的1 m²样地测产,重复测量5次,称量地上部分鲜质量;累加每次刈割的苜蓿与苏丹草鲜质量,得出每年苜蓿和苏丹草的地上部分鲜质量。②地下部分:进行动态取土样时

收集植物地下部根系样品,并用蒸馏水冲洗干净后用吸水纸吸干进行称量。

测完植物鲜质量后,将植物地上、地下部样品在干燥箱中110℃下杀青后降温至85℃干燥至质量恒定,称量植物地上、地下部干质量,计算每种牧草的地上和地下部干质量。

(3) 叶面积指数计算

叶面积指数(LAI)是单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数。每小区取5株牧草,利用网格法将叶片描边,计算实际面积与叶片最大长宽乘积的比值,即叶面积指数。

因牧草间物种不同,且植株大小不等,绝对生长速率无可比性,本研究引入相对生长速率(Relative growth rate, RGR),以便更好分析暗管条件下种植不同牧草的响应。RGR计算式为

$$R = \frac{\ln \frac{M_i}{M_0}}{t_i - t_0} \quad (2)$$

式中 M_i —— t_i 时株高, m M_0 —— t_0 时株高, m
 t_i 、 t_0 ——种植时间, d

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2010 初步处理指标数据,采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析,并采用最小显著差异法 (Least significant difference, LSD) 进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 暗管条件下耐盐牧草对盐渍化土壤结构的影响

2.1.1 土壤容重

如图 2(图中不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示,改良前,研究区土壤表层容重最大,随深度增加呈降低趋势。改良初期(2020年4月)各处理0~20 cm 土层(表层)容重无显著差异(图 2a),在 1.553~1.583 g/cm³ 间变化;通过一年暗管+牧草种植的改良,收获期(2020年10月)暗管条件下种植牧草的表层容重较 CK 下降 7.4%~10.3% ($P < 0.05$),而 T 处理较 CK 降低 3.4%,效果不显著($P > 0.05$)。另外,因盐渍土冬季冻融,且无植物生长等因素,导致试验区各处理表层容重在第 2 年播种前(2021年4月)较上一年(2020年10月)增大,增幅在 0.010~0.096 g/cm³ 间,其中 T 处理增幅最大。第 2 年收获期各处理表层容重较年初显著降低,降幅在 0.012~0.184 g/cm³ 间。

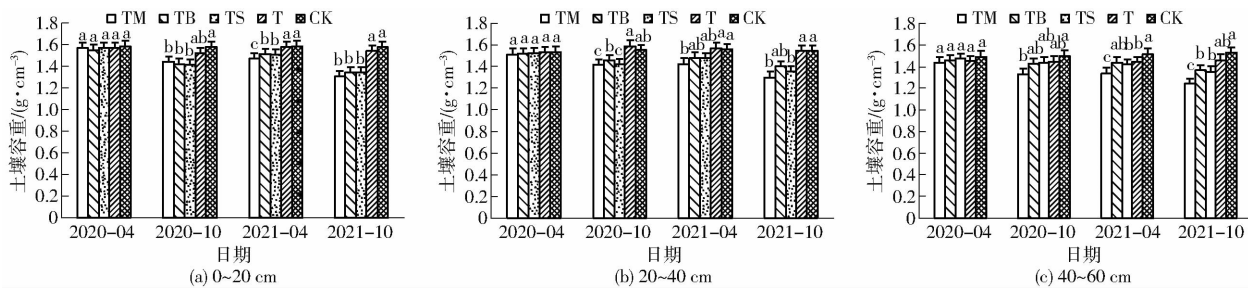


图 2 暗管条件下种植牧草对盐渍土壤容重的影响

Fig. 2 Effect of planting salt-tolerant forage grass on saline soil density under subsurface pipe

2.1.2 土壤孔隙度

暗管条件下种植耐盐牧草对盐渍土孔隙度影响如图 3 所示。改良前各处理表层孔隙度为 40.3%~41.4%,第 1 年收获期暗管+牧草处理表层孔隙度较年初显著提高 10.5%~13.3%,而 T 处理仅提高 4.9%;且经过冬闲期 CK 孔隙度降低 2.4%。第 2 年收获期暗管+牧草处理表层孔隙度较年初增加 13.3%~17.2%,CK 和 T 处理仅增加 0.5% 和 3.9%。2 年暗管+牧草处理的表层孔隙度增加 18.7%~24.3%,其中 TM 增幅最大,而 T 仅提高 3.1%。各处理耕作层和心土层孔隙度变化趋势与表层类似(图 3b、3c)。改良前耕作层孔隙度在

通过 2 年暗管+牧草协同作用的土壤表层容重降低 0.205~0.250 g/cm³,其中 TM 处理降幅最大,而 T 处理仅降低 0.027 g/cm³。说明暗管-牧草双重作用可有效降低土壤表层容重,较单独暗管处理效果佳。图 2b 为 20~40 cm 土层(耕作层)容重变化,其变化趋势与表层类似。改良前耕作层容重在 1.514~1.534 g/cm³ 间,2 年的收获期暗管+牧草处理耕作层容重显著下降,其中 TM 处理降幅最大,而单独暗管 T 和 CK 处理较改良前增加。图 2c 为各处理 40~60 cm 土层(心土层)容重变化。第 1 年收获期除 CK 外其它处理容重均降低,其中 TM 容重最低。第 2 年播种前各处理容重均增加,其中 TM 增幅最小,这是由于苜蓿是多年生植物,秋季收获地上部分后根系并未移除,起到了稳固土壤结构的作用,降低土壤容重。第 2 年试验期,除了 T 和 CK 处理,其余处理心土层容重均显著下降,降幅由大到小依次为 TM、TS、TB、T、CK。整体分析发现,各处理 0~60 cm 土层随深度增加,其容重降幅逐渐减小,这是由于植物根系在耕作层发达,根系的穿插作用使土壤孔隙增多,改善土壤结构,降低容重,而到心土层及以下,根系量显著降低,形成犁底层,容重增大。2 年试验结果表明,CK 处理容重较改良前增加 0.8%,平均容重 TM 处理降幅最大,为 1.416 g/cm³,较 CK 降低 9.4%,而单独暗管 T 处理仅降低 0.2%。

42.0% 左右,收获期(2020年10月)牧草处理耕作层孔隙度较年初提高 6.1%~12.5% ($P < 0.05$),而 T 处理耕作层孔隙度较年初降低 2.2%;2021 年收获期暗管+牧草处理耕作层孔隙度较年初提高 9.9%~11.0%,而 T 处理仅增加 2.4%。2 年暗管+牧草处理显著提高耕作层孔隙度 12.6%~21.6% ($P < 0.05$),但 CK 和 T 处理耕作层孔隙度分别降低 0.8% 和 1.1%。2021 年收获期暗管+牧草处理显著提高心土层孔隙度 10.3%~21.4%,而 CK 和 T 处理心土层孔隙度分别下降 2.9% 和 1.0%。说明暗管+牧草双重作用可有效提高土壤孔隙度,较单独暗管处理效果好,TM 处理平均孔隙度最大,

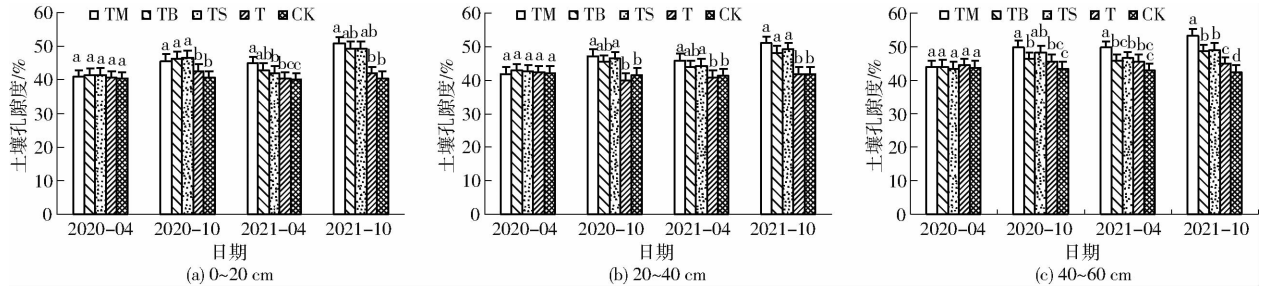


图3 暗管条件下种植牧草对盐渍土壤孔隙度的影响

Fig. 3 Effect of planting salt-tolerant forage grass on saline soil porosity under subsurface pipe

为 51.6%。

2.2 暗管条件下耐盐牧草对土壤有机质含量的影响

分析表 2 可知,在 0~20 cm 土层,单独暗管 T 处理土壤有机质(SOM)含量随时间推移呈下降趋势,2 年收获期平均降低 18.1%,说明暗管在盐分淋洗时有一定的 SOM 流失,而 2 年试验期 CK 表层 SOM 含量仅降低 4.2% ($P > 0.05$)。暗管+牧草处理表层 SOM 随时间推移呈下降-上升-下降的变化趋势,即牧草生育期表层 SOM 下降,第 2 年种植前表层 SOM 略有提升,生育期再下降。2 年收获期暗管+牧草处理表层 SOM 含量降幅平均为 3.3%~5.9%,第 2 年收获期 TM 处理表层 SOM 含量最高,较 CK 提高 6.2%,较 T 处理提高 24.3% ($P < 0.05$)。在 20~40 cm 耕作层,2 年收获期 T 处理耕作层 SOM 含量降低 26.6%,CK 降低 14.4%,而暗管+牧草处理耕作层 SOM 随时间推移变化趋势差异较大。TM 处理 SOM 含量呈升高趋势,2 年收获

期提高 5.0%;TB 和 TS 处理呈下降趋势,第 2 年降低 2.8% 和 5.6%。在 40~60 cm 心土层,收获期各处理 SOM 含量下降 7.9%~16.1% ($P < 0.05$),T 处理降幅最大,为 16.1%,而 CK 心土层 SOM 基本保持不变。说明在没有人扰动下,心土层 SOM 基本不受影响。而暗管工程的实施对 0~60 cm 土层 SOM 影响较大,特别是单独暗管处理显著降低 SOM,2 年收获期平均下降 20.3%,但配套种植耐盐牧草可有效缓解 0~60 cm 土层有机质的流失。牧草生育期处于养分消耗状态,暗管+牧草处理 SOM 虽呈下降趋势,但降幅远低于单独暗管处理,且牧草根系发达,经过冬歇,微生物分解根系残体后在一定程度上提高了 SOM,可有效缓解土壤有机质的消耗,对维持 SOM 平衡具有积极的现实意义。相比种植其他耐盐牧草,暗管条件下种植苜蓿缓解土壤有机质损失的效果较佳,2 年收获期 SOM 含量为 8.9 g/kg,较 CK 提高 5.0%。

表 2 2 年不同处理土壤有机质含量

Tab. 2 Variation characteristics of soil organic matter for two years

g/kg

处理	0~20 cm				20~40 cm				40~60 cm			
	2020年 4月	2020年 10月	2021年 4月	2021年 10月	2020年 4月	2020年 10月	2021年 4月	2021年 10月	2020年 4月	2020年 10月	2021年 4月	2021年 10月
TM	11.31 ^a	10.97 ^a	11.38 ^a	10.88 ^a	8.49 ^b	8.52 ^b	8.79 ^b	9.23 ^a	7.21 ^a	6.78 ^a	6.87 ^a	6.64 ^a
TB	11.12 ^a	10.59 ^a	11.09 ^a	10.38 ^{ab}	9.39 ^a	8.69 ^b	8.53 ^b	8.77 ^b	6.98 ^a	6.33 ^b	6.37 ^b	6.01 ^{bc}
TS	11.22 ^a	10.69 ^a	11.14 ^a	10.35 ^b	9.52 ^a	9.16 ^a	9.37 ^a	8.85 ^b	7.35 ^a	6.69 ^a	6.78 ^{ab}	6.29 ^b
T	11.17 ^a	9.45 ^b	9.23 ^c	8.75 ^c	9.51 ^a	7.91 ^c	7.87 ^c	6.98 ^d	6.77 ^{ab}	6.04 ^{bc}	6.23 ^{bc}	5.68 ^c
CK	11.29 ^a	10.88 ^a	10.85 ^b	10.25 ^{bc}	8.43 ^b	8.18 ^b	8.07 ^b	7.67 ^c	6.22 ^b	6.01 ^c	6.18 ^c	6.23 ^b

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 暗管条件下耐盐牧草产量变化

2.3.1 株高

暗管条件下不同耐盐牧草株高变化如图 4 所示,2 年各处理牧草株高生长趋势基本一致。各处理在苗期株高无显著差异,范围在 14.4~17.3 cm 间;7 月 25 日各处理株高较苗期显著增长;生长旺盛期 TM 处理较 7 月 25 日 2 年平均增加 11.5 cm,增幅低于生长初期,TB 和 TS 处理较 7 月 25 日分别平均增加 36 cm 和 64 cm,达到 148 cm 和 178 cm,增幅低于生长初期;

收获期,各处理株高达到整个生育期最高值,TM、TB、TS 处理株高分别为 57.4、188.3、233.5 cm。

为深入分析暗管条件下不同牧草生长响应,本研究引入相对生长速率(RGR)。2 年各处理 RGR 随生育期变化如图 5 所示,均呈下降趋势。2020 年 7 月暗管条件下 3 种牧草 RGR 由大到小依次为苏丹草、甜高粱、苜蓿;8 月各处理 RGR 较 7 月降低 79.6%~57.6% ($P < 0.05$),甜高粱和苏丹草 RGR 降幅显著高于苜蓿;9 月收获期牧草

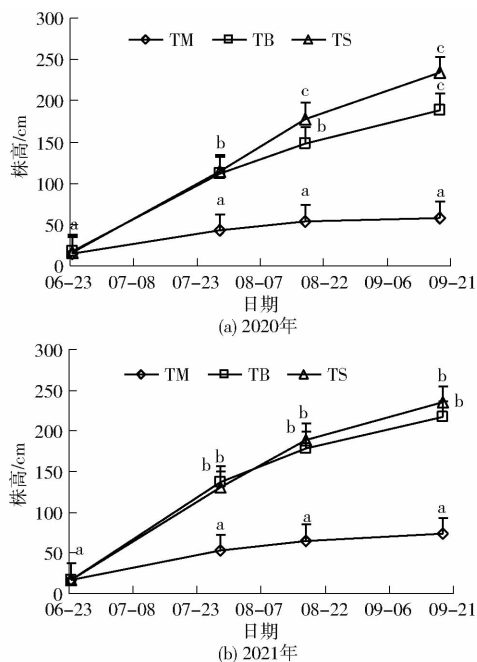


图4 暗管条件下不同耐盐牧草株高变化曲线

Fig. 4 Plant height of different salt-tolerant forage grass

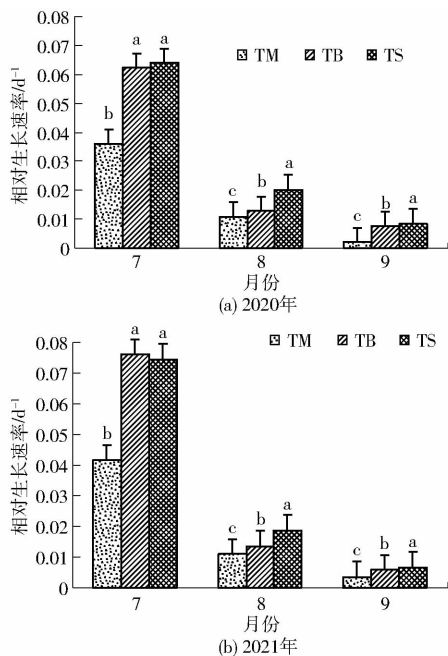


图5 2年耐盐牧草相对生长速率

Fig. 5 Relative growth rates of salt-tolerant forage grass in two years

RGR 在 25.2% ~ 82.4% 间,各处理均低于 8 月。2021 年 7 月各处理 RGR 均高于 2020 年, TM、TB、TS 处理分别增加 15.7%、22.4% 和 16.5% ($P < 0.05$); 8 月 TM、TB 处理 RGR 高于 2020 年同期, 分别增长 0.2%、7.0%, TS 处理 RGR 低于 2020 年,降低 7.6% ($P < 0.05$)。9 月收获期,除 TM 处理,其他处理均低于 2020 年同期。

2.3.2 叶面积指数

叶片是植物进行光合作用的重要器官,是影响

产量的关键因素。2 年不同耐盐牧草 LAI 整体变化趋势一致(图 6)。各处理 LAI 随生育期推移呈上升趋势,但生育期末末期 LAI 增速较慢。2020 年 6 月各处理 LAI 在 0.19 ~ 0.34 间;7 月各处理 LAI 较 6 月显著增大,TS 处理 LAI 为 6.77,显著高于其他处理;8 月各处理 LAI 较 7 月增加 0.13 ~ 1.92;9 月收获期各处理 LAI 较 8 月增加 0.21 ~ 0.83,苏丹草最高,是其他处理的 1.6 ~ 5.9 倍。2021 年各处理 LAI 整体高于 2020 年。7 月下旬各处理 LAI 较同期提高 5.7% ~ 30.8%;2021 年收获期各处理 LAI 较 2020 年提高 1.2% ~ 10.5%。

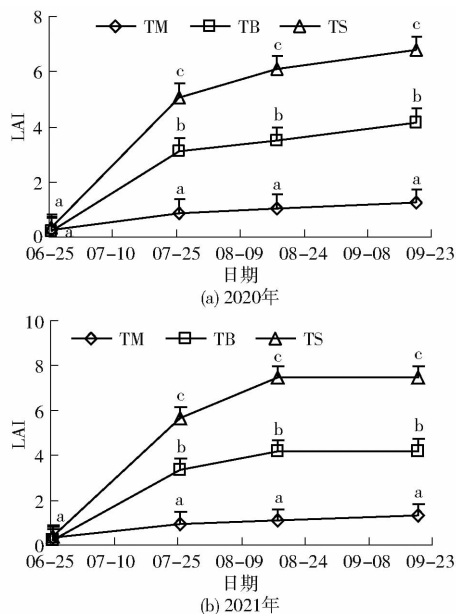


图6 2年耐盐牧草叶面积指数变化曲线

Fig. 6 Leaf area index of salt-tolerant forage grass in two year

2.3.3 生物量

耐盐牧草生物量不仅体现了牧草产量,且是计算牧草选择性吸收盐分的基础指标之一。2 年耐盐牧草地上、地下部生物量如表 3 所示(因苜蓿是多年生牧草,地下部生物量不测量)。由表 3 可知,3 种耐盐牧草生物量差异较大,同一年各处理鲜质量和干质量差异显著,苏丹草最高。相比 2020 年,2021 年 TM、TB、TS 处理地上部鲜质量提高 49.2%、34.3%、24.6% ($P < 0.05$),其中苜蓿增幅最大,这是由于苜蓿是多年生植物,生物量在一定年限内逐年递增。2021 年 TM、TB、TS 处理地上部干质量较 2020 年分别提高 51.8%、28.5%、24.4% ($P < 0.05$),苜蓿地上部干质量增幅最大。各处理地下部鲜质量和干质量变化趋势与地上部分类似,苏丹草地上、地下部生物量均最高。综合分析,苏丹草地上部鲜质量和干质量均显著高于甜高粱和苜蓿,但苜蓿较甜高粱、苏丹草增产效果更佳。

表3 2年不同处理生物量

Tab.3 Biomass for different treatments in two years

kg/hm²

处理	2020年				2021年			
	地上部鲜质量	地下部鲜质量	地上部干质量	地下部干质量	地上部鲜质量	地下部鲜质量	地上部干质量	地下部干质量
TM	9 170		2 731		13 680		4 146	
TB	15 670	2 965	7 796	1 483	21 040	4 440	10 019	2 312
TS	20 440	4 001	9 084	1 726	25 470	5 644	11 296	2 424

为进一步分析牧草生长指标与干质量的关系,研究了不同牧草干质量与株高、叶面积指数间相关性(表4)。由表4可知,苜蓿、甜高粱干质量与株高呈显著正相关关系($P < 0.05$, 相关系数 r 均为 0.89),与 LAI 呈正相关(r 为 0.79、0.65),且苜蓿株

高与 LAI 呈显著正相关($P < 0.05$, $r = 0.95$),甜高粱株高与 LAI 呈正相关($r = 0.35$)。苏丹草干质量与 LAI 呈显著正相关($P < 0.05$, $r = 0.94$),与株高呈正相关($r = 0.77$),且株高与叶面积指数呈正相关($r = 0.65$)。

表4 牧草生长指标间相关系数

Tab.4 Correlation coefficient among forage grass growth indicators

指标	苜蓿			甜高粱			苏丹草		
	株高	叶面积指数	牧草干质量	株高	叶面积指数	牧草干质量	株高	叶面积指数	牧草干质量
株高	1			1			1		
叶面积指数	0.95*	1		0.35	1		0.65	1	
牧草干质量	0.89*	0.79	1	0.89*	0.65	1	0.77	0.94*	1

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关。

3 讨论

暗管条件下耐盐牧草与盐渍土间交互效应繁杂,影响着土壤结构的变化。土壤容重是衡量土壤结构的重要指标,反映了土壤通透性^[18]。研究发现,盐渍地上种植耐盐牧草,显著改善土壤理化指标,但种植不同耐盐牧草改土效应存在较大差异^[19];种植苜蓿等耐盐碱植物可降低土壤容重 10.3%~21.3%,增加了土壤孔隙度,进而改善土壤通气性^[20-21];景鹏成等^[22]在南疆地区开展耐盐牧草种植,也发现种植耐盐牧草可有效降低土壤容重。本研究暗管+牧草处理也得到类似结果。本研究结果显示,各处理 0~60 cm 土层容重均不同程度降低,且随深度增加,降幅逐渐减小。这是因为牧草根在土壤表层与耕作层发达,根系穿插作用提高土壤孔隙度,改善土壤结构,而心土层及以下土层,根系量显著降低,形成犁底层,容重较大。各处理 2 年平均容重降幅最大的是 TM 处理,较 CK 降低 9.4% ($P < 0.05$),因为苜蓿是多年生植物,随年限增长,根系逐渐延伸至心土层,改善土壤结构,降低容重幅度大。而仅暗管排水工程措施(T 处理)土壤表层容重下降幅度较小,心土层(40~60 cm)土壤容重有所升高,且 CK 处理 0~60 cm 土壤容重平均增加 0.8%,这与侯毛毛等^[23]研究结果存在差异,这可能是因为研究区、土壤质地不同等因素造成的,同时也说明了仅采取暗管措施降低土壤容重效果较差,而

配套种植耐盐牧草,二者协同作用可有效降低土壤容重,达到改善土壤结构的效果。

土壤容重与土壤孔隙度显著相关,其大小直接影响土壤孔隙度和土壤水肥气热分布,进而影响作物生长发育^[24-25]。暗管排水与种植耐盐牧草相结合有利于改善土壤容重和孔隙度,改良土壤结构。暗管排水条件下,土壤处于干湿交替环境,土壤颗粒脱水重组团聚体,排水后土壤颗粒易转化为凝胶状态,有利于土壤结构化,提高土壤孔隙率^[26]。本研究结果显示,2 年暗管条件下种植牧草均显著提高盐渍土壤孔隙度,0~60 cm 土层平均孔隙度提高 10.3%~24.3% ($P < 0.05$),TM 处理增幅最大,较 CK 处理提高 24.3% ($P < 0.05$),而单独暗管 T 处理仅表层土壤孔隙度较 CK 提高 3.1%,耕作层和心土层反而下降 1.4%。这是因为暗管条件下牧草种植显著降低土壤容重,改善土壤通气性,有效增加牧草根系向深层土壤延伸,而丰富的根系穿插起到疏松土壤作用,进而提高土壤孔隙度。苜蓿作为多年生牧草,经过 2 年试验,丰富的根系更利于土壤结构化,降低土壤容重,提高土壤孔隙度效果更好。

SOM 含量是衡量土壤质量的最重要指标之一,是形成土壤团粒结构的主要胶结物质,提高盐渍土的 SOM 含量是治理盐渍土的一个重要目标。单独暗管排水工程措施淋洗脱盐的同时,易造成土壤养分流失,降低土壤养分含量^[27],这与本研究结论一致。本研究发现,各处理 SOM 含量随土层深度增加

而逐渐减少,单独暗管 T 处理 0~60 cm 土层有机质流失严重,2 年平均降低 20.3% ($P < 0.05$),而暗管条件下种植牧草可有效缓解 SOM 流失,下降幅度远低于单独暗管处理,对维持 SOM 含量平衡具有积极的现实意义。因此,在采用暗管工程措施改良盐渍土时,须加强暗管管理区土壤的培肥管理^[28]。本试验中,相比种植其他耐盐牧草,暗管条件下种植苜蓿防止 SOM 流失的效果较好,2 年平均提高 0~60 cm 土层 SOM 含量 5.0% ($P < 0.05$)。

盐渍土改良是一个漫长、复杂且见效缓慢、动态不稳定的过程。本研究采取暗管排水工程措施结合种植耐盐牧草的生物措施,协同改善盐渍土结构,提高 SOM 含量,增加牧草产量,但因试验周期较短,此结果仅为初期改良效应,缺乏深入的机理性分析与土壤改良效果稳定性分析。因此,未来需开展长期

监测土壤物理化学性质与牧草生长指标的试验,积累充足的数据,分析工程+生物措施改良盐渍土的长期影响效果,综合评价改良措施的实际应用效果。

4 结束语

相比对照处理,2 年暗管条件下 3 种耐盐牧草种植改良盐渍土效果显著,种植苜蓿处理效果较佳,0~60 cm 土层平均容重降低 9.4%,土壤孔隙度提高 24.3%,耕作层有机质含量提高 5.0% ($P < 0.05$),有效缓解土壤有机质流失,维持土壤有机质含量平衡,且苜蓿株高增幅最高,增产效果最佳。因此,在内蒙古河套灌区农牧交错区的暗管工程改良盐渍土宜选择种植苜蓿,以达到改善盐渍土结构、提高土壤有机质含量与牧草增产的效果,最终实现盐渍土改良与农牧业可持续发展的目的。

参 考 文 献

- [1] RENGASAMY P. World salinization with emphasis on Australia[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(5): 1017–1023.
- [2] 张义强,王瑞萍,白巧燕. 内蒙古河套灌区土壤盐碱化发展变化及治理效果研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(增刊1): 118–122.
ZHANG Yiqiang, WANG Ruiping, BAI Qiaoyan. Development and change of soil salinization in Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(Supp.1): 118–122. (in Chinese)
- [3] 万核洋,齐泓玮,尚松浩. 河套灌区土壤质地克里金插值与平滑效应校正[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(1): 339–350.
WAN Heyang, QI Hongwei, SHANG Songhao. Ordinary Kriging interpolation and smoothing effect correction for soil texture mapping in Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(1): 339–350. (in Chinese)
- [4] WANG Z H, HENG T, LI W H, et al. Effects of subsurface pipe drainage on soil salinity in saline-sodic soil under mulched drip irrigation[J]. *Irrigation and Drainage*, 2020, 69(1): 95–106.
- [5] LI X W, ZUO Q, SHI J C, et al. Evaluation of salt discharge by subsurface pipes in the cotton field with film mulched drip irrigation in Xinjiang, China I. Calibration to models and parameters[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(4): 537–544.
- [6] 李彦鑫,徐丽,齐菲,等. 滨海盐碱农田暗管排盐渗流场模拟[J]. *中国生态农业学报*, 2023, 31(7): 1110–1120.
LI Yanxin, XU Li, QI Fei, et al. Seepage field simulation of subsurface pipe salt drainage processes in coastal saline-alkali farmland[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(7): 1110–1120. (in Chinese)
- [7] 衡通,何新林,杨丽莉,等. 暗管与竖井排水工程改良新疆盐渍土的设计与效果评价[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 111–118.
HENG Tong, HE Xinlin, YANG Lili, et al. Design and effect evaluation of subsurface pipe and vertical shaft drainage project to improve saline soil in Xinjiang[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(21): 111–118. (in Chinese)
- [8] 窦旭,史海滨,李瑞平,等. 农田排水改良盐渍化土壤效果与环境污染研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(4): 372–385.
DOU Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of farmland drainage on improving saline soil and environmental pollution[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(4): 372–385. (in Chinese)
- [9] 张晶,杨树青,郑彦,等. 生物措施显著提高农牧交错区盐渍土的暗管排盐效果[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(12): 2299–2309.
ZHANG Jing, YANG Shuqing, ZHENG Yan, et al. Biological measures significantly improve the salt discharge effect of subsurface pipes in saline soil of the agro-pastoral ecotone in Inner Mongolia[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(12): 2299–2309. (in Chinese)
- [10] 周利颖,李瑞平,苗庆丰,等. 排盐暗管间距对河套灌区重度盐碱土盐碱特征与肥力的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(3): 602–609.
ZHOU Liying, LI Ruiping, MIAO Qingfeng, et al. Effects of underground drainage pipe spacing on salt and alkali characteristics and fertility of heavy saline soil in Hetao Irrigation Area[J]. *Soils*, 2021, 53(3): 602–609. (in Chinese)
- [11] 肖克飏,吴普特,雷金银,等. 不同类型耐盐植物对盐碱土生物改良研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(12): 2433–2440.
XIAO Kebiao, WU Pute, LEI Jinyin, et al. Bio-reclamation of different halophytes on saline-alkali soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12): 2433–2440. (in Chinese)

- [12] 温延臣,孔少华,赵同凯,等. 黄河三角洲盐碱地区耐盐牧草与经济作物筛选[J]. 山东农业科学,2019,51(5):42-46.
WEN Yanchen, KONG Shaohua, ZHAO Tongkai, et al. Screening of salt-tolerant herbage and economic crops in saline-alkali areas of the Yellow River Delta[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(5): 42-46. (in Chinese)
- [13] 张永宏. 盐碱地种植耐盐植物的脱盐效果[J]. 甘肃农业科技,2005(3):48-49.
ZHANG Yonghong. Desalination effects of salt tolerant plants growing in alkali-saline soil in Ningxia[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2005(3): 48-49. (in Chinese)
- [14] 谭攀,王士超,谢锦,等. 暗管排水与秋葵种植协同改良滨海盐土的施肥效应研究[J]. 河南农业科学,2023,52(5):99-109.
TAN Pan, WANG Shichao, XIE Jin, et al. Study on the fertilization effect of subsurface pipe drainage and okra planting in improving coastal saline soil[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(5): 99-109. (in Chinese)
- [15] 蔺海明,贾恢先,张有福,等. 毛苕子对次生盐碱地抑盐效应的研究[J]. 草业学报,2003,12(4):58-62.
LIN Haiming, JIA Huixian, ZHANG Youfu, et al. Effect of salt restraint on *Vicia villosa* in secondary salinization land[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2003, 12(4): 58-62. (in Chinese)
- [16] ASHUTOSH M, SHARMA S D, KHAN G H. Improvement in physical and chemical properties of sodic soil by 3, 6 and 9 years old plantation of *Eucalyptus tereticornis* biorejuvenation of sodic soil[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 184: 115-124.
- [17] 窦晓慧,李红丽,盖文杰,等. 牧草种植对黄河三角洲盐碱土壤改良效果的动态监测及综合评价[J]. 水土保持学报,2022,36(6):394-401.
DOU Xiaohui, LI Hongli, GAI Wenjie, et al. Dynamic monitoring and comprehensive evaluation of the effect of pasture cultivation on saline soil improvement in the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 394-401. (in Chinese)
- [18] MENG X Y, RAN C, LIU B L, et al. Effects of straw returning to field and nitrogen application on soil nutrients and rice yield in black soil areas of Northeast China[J]. Crops, 2021(3): 167-172.
- [19] XIE X F, PU L J, WANG Q Q, et al. Response of soil physicochemical properties and enzyme activities to long-term reclamation of coastal salinesoil, Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 1419-1427.
- [20] 侯贺贺,王春堂,王晓迪,等. 黄河三角洲盐碱地生物措施改良效果研究[J]. 中国农村水利水电,2014(7):1-6.
HOU Hehe, WANG Chuntang, WANG Xiaodi, et al. A study of improvement effects by biological measures in the Yellow River Delta saline-alkali soil[J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(7): 1-6. (in Chinese)
- [21] 胡发成. 种植苜蓿改良培肥地力的研究初报[J]. 草业科学,2005,22(8):47-49.
HU Facheng. Initial research report on soil fertility improvement by planting *Medicago sativa*[J]. Pratacultural Science, 2005, 22(8): 47-49. (in Chinese)
- [22] 景鹏成,王树林,陈乙实,等. 耐盐牧草对南疆地区盐渍土的适应和改良研究[J]. 草业学报,2017,26(10):56-63.
JING Pengcheng, WANG Shulin, CHEN Yishi, et al. Adaptation of salt-tolerant forage grasses to saline soil and their ability to improve saline soil utilization in southern Xinjiang region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(10): 56-63. (in Chinese)
- [23] 侯毛毛,陈竞楠,杨祁,等. 暗管排水和有机肥施用下滨海设施土壤氮素行为特征[J]. 农业机械学报,2019,50(11):259-266.
HOU Maomao, CHEN Jingnan, YANG Qi, et al. Behavior of coastal greenhouse soil nitrogen as influenced by subsurface drainage and organic fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 259-266. (in Chinese)
- [24] 裴忠雪. 东北典型垦区土壤物理性质与肥力关系及其对造林的响应[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2016.
PEI Zhongxue. Associations between soil physical properties and soil fertilities and the response to afforestation practices in the typical reclamation area of NE China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016. (in Chinese)
- [25] 陈帅. 黑土区坡耕地玉米秸秆还田水土保持功效研究[D]. 长春:中国科学院大学,2019.
CHEN Shuai. Effect of corn straw returning on soil and water conservation in slopping farmland of black soil region[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [26] 艾天成,李方敏. 暗管排水对涝渍地耕层土壤理化性质的影响[J]. 长江大学学报(自然版)农学卷,2007,4(2):4-5,8.
AI Tiancheng, LI Fangmin. Effect of subsurface drainage on physical and chemical properties of cultivated strata on waterlogged land[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition) Agricultural Science Volumn, 2007, 4(2): 4-5,8. (in Chinese)
- [27] 田冬,桂丕,李化山,等. 不同改良措施对滨海重度盐碱地的改良效果分析[J]. 西南农业学报,2018,31(11):2366-2372.
TIAN Dong, GUI Pi, LI Huashan, et al. Effect of different measures on improvement of seashore saline alkali land[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2018,31(11): 2366-2372. (in Chinese)
- [28] 郑敏娜,梁秀芝,韩志顺,等. 不同改良措施对盐碱土土壤细菌群落多样性的影响[J]. 草地学报,2021,29(6):1200-1209.
ZHENG Minna, LIANG Xiuzhi, HAN Zhishun, et al. Effects of different improvement measures on the diversity of soil bacteria communities in salt-alkali soil[J]. Acta Agrestia Sinca, 2021, 29(6): 1200-1209. (in Chinese)