

基于不同滤层的暗管排盐效率及防淤堵效果研究^①

王旭^{1,2,3}, 沈婧丽^{1,2}, 樊丽琴^{1,2,3*}, 吴霞^{1,2}, 陈文茜^{1,2}, 高明^{1,2}

(1 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2 国家农业环境银川观测试验站, 银川 750002; 3 国家盐碱地综合利用技术创新中心银川试验站, 银川 750002)

摘要: 外包滤料是预防堵塞、保障暗管高效排水的关键所在。针对排水暗管易堵塞导致排盐效率低的技术瓶颈, 采用自主设计的暗管排水模拟试验法, 设置砂砾石混合、砂砾石分层、砂砾石混合组合秸秆、砂砾石分层组合秸秆 4 种暗管滤层处理, 并以无滤料的暗管处理为对照, 系统评估不同滤层对暗管排盐效率及防淤堵效果的影响。结果表明: ①砂砾石分层处理的暗管排盐率最高, 为 47%。②在无滤料条件下, 土壤颗粒在暗管土工布迎水面形成致密的滤饼层; 在砂砾石及其与秸秆组合的滤料条件下, 土壤颗粒滞留在暗管土工布纤维结构中。③砂砾石混合、分层及其与秸秆组合滤层能将暗管滤料上方土壤特征粒径 d_{90} 值分别提升 12.5%、14.0%、11.0%、10.5%, 有效发挥滤料拦截粗颗粒、放行细颗粒的作用, 诱导周围土壤形成由砂粒等粗颗粒组成的具有高渗透性的土壤透水骨架。本研究揭示了不同滤层对暗管排盐效率及防淤堵效果的影响, 为应用暗管排盐技术治理盐碱地提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 暗管排水; 盐分; 滤料; 排水率; 排盐率; 脱盐率

中图分类号: S276.1 文献标志码: A

Research on Salt Drainage Efficiency and Anti-silting Effect of Subsurface Pipe with Different Filter Layers

WANG Xu^{1,2,3}, SHEN Jingli^{1,2}, FAN Liqin^{1,2,3*}, WU Xia^{1,2}, CHEN Wenqian^{1,2}, GAO Ming^{1,2}

(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2 Station of Observation and Experiment, National Agricultural Environment in Yinchuan, Yinchuan 750002, China; 3 Yinchuan Experimental Station of National Innovation Center for Comprehensive Utilization of Saline-Alkali Land Technology, Yinchuan 750002, China)

Abstract: The use of outsourced filter materials is crucial for preventing blockages and ensuring efficient drainage in subsurface pipes. This study conducted a series of laboratory simulation experiments using a self-designed apparatus for subsurface pipes to address the technical bottleneck of low salt discharge efficiency, which is caused by the frequent blockage of these pipes. Based on a unified geotextile setup, four types of filter layers were established for subsurface pipes: a sand and gravel mixture, layered sand and gravel, a sand and gravel mixture combination with straw, and layered sand and gravel combined with straw, while a control group without any filter material. The effects of different filter layers on salt drainage efficiency and anti-silting effect of the subsurface pipes were systematically evaluated. The results indicated that: 1) The subsurface pipe with the layered sand and gravel treatment achieved the highest salt drainage rate of 47%. 2) When no filter material was used, a dense filter cake layer formed by soil particles on the surface of the geotextile. In both the layered sand and gravel treatment and the sand and gravel combination with straw, soil particles were retained within the fiber structure of geotextiles. 3) Soil characteristic particle size d_{90} value above the filter material increased by 12.5%, 14.0%, 11.0%, and 10.5% with the use of a sand and gravel mixture, layered sand and gravel, a sand and gravel mixture combination with straw, and layered sand and gravel combined with straw, respectively. This effectively enabled the filter materials to intercept coarse particles while allowing fine particles to pass through, thereby promoting the formation of a highly permeable soil skeleton composed of coarse particles, such as sand particles, in the

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42367043)、宁夏自然科学基金项目(2024AAC03373)和宁夏回族自治区农业科技自主创新项目(NGSB-2021-11-03)资助。

* 通信作者(fanlqnx@126.com)

作者简介: 王旭(1990—), 男, 宁夏中卫人, 博士, 副研究员, 主要从事盐碱地水土资源高效利用研究。E-mail: wangxu640321@126.com

surrounding soil. The study reveals the impacts of the different filter layers on the efficiency of subsurface drainage for salt removal and their role in preventing blockages, thus provides a theoretical basis and technical support for utilizing subsurface pipe salt discharge technology to manage saline-alkali land.

Key words: Subsurface pipe drainage; Salinity; Filter material; Drainage rate; Salt discharge rate; Leaching desalination rate

土壤盐碱化是造成土壤退化, 粮食减产, 进而威胁农林生态健康的因素之一^[1]。据统计, 全球受土壤盐碱化影响的国家和地区超过一百个, 面积达 9.5 亿 hm^2 ^[2-3]; 到 21 世纪中叶将有超过一半的耕地出现不同程度的盐碱化问题^[4]。我国盐渍土面积近 1 亿 hm^2 , 主要分布在华北、东北、滨海及西北内陆干旱地区^[5]。宁夏地处我国西北内陆干旱区, 北部引黄灌区具有蒸发大、降水少、地势平坦低洼、地下水位高、盐分上移占优势等鲜明特征, 导致土壤盐碱化严重, 盐碱化耕地面积约为 $1.48 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占耕地总面积的 33.54%^[6]。合理利用盐碱地能为农业可持续发展提供后备土地资源, 对守住 18 亿亩耕地红线具有重要意义, 同时, 对改善黄河中上游生态环境, 推进黄河流域生态环境保护和高质量发展具有重要作用。

暗管技术具有高效、节地、利于机械化作业的优点^[7-9], 其在降低土壤盐分的同时还能控制地下水位, 克服了传统治理无法将盐分排出土体的弊端^[10-11]。自 1980 年宁夏引进暗管技术, 经过多年的研究与应用, 田间暗管面积达 $1.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 现已成为解决银北灌区盐渍化危害的首选方案^[12]。暗管排水系统主要通过调节土壤饱和导水率、有效孔隙率来促进排盐。气候和土壤条件是决定暗管间距、埋深最主要的因素^[13-14]。众多学者通过研究提出了不同脱盐标准下的暗管埋深、间距和管径等工程参数^[15-16]。然而, 在盐碱地治理中, 土粒、植物根系以及化学沉淀物会导致暗管堵塞, 制约暗管高效排盐效果。有研究表明, 粗砂或黏壤土能形成天然反滤层, 而黏粒含量低、粉粒含量高的土壤更容易堵塞排水管^[17]。砂砾石、秸秆等物料因方便就地取材, 被广泛用作暗管外包滤料以预防或缓解淤堵。分层滤料结构因其不同层级材质或粒径的孔隙不同, 能改善暗管周围的渗流条件, 在防止或减缓暗管流量衰减方面效果更好^[18]。然而, 分层滤料在实际应用中缺乏配套的专有机具, 当前虽然在模拟试验中有所涉及, 但在田间实际应用中较少。暗管上方铺设砂石滤料, 主要利用细砂垫层与黏壤土之间的导水率差异, 减缓土壤水向暗管底部的绕流速率, 从而使暗管上部产生局部饱和区, 促进暗管排水排盐^[19]。暗管外包滤料的反滤效果与土壤颗粒组成及滤料孔径等因素密切相关^[20]。常用的砂砾石、

秸秆滤料在混合和分层条件下, 能否在暗管周围形成高渗透性的土壤透水骨架促进暗管排水? 不同滤料条件下, 暗管外包土工布的淤堵类型有何差异? 这些均是当前暗管外包滤料研究中亟待回答的问题。

外包滤料是影响暗管高效排水的关键所在。采用野外调查的手段探究田间暗管不同滤料的防淤堵效果, 以及采用模拟试验研究外包吸附材料对改善暗管排水脱盐的效果已有相关报道^[21-22]。但通过模拟装置研究砂砾石、秸秆等不同外包滤料对暗管排盐效率及防淤堵效果的影响还鲜见报道。为此, 本研究通过自主设计的暗管排水模拟装置, 系统评估砂砾石混合、分层及其与秸秆组合等滤层对暗管排盐效率及防淤堵效果的影响, 并通过分析滤料上方土壤粒径组成和利用电子显微镜观察土工布表面及内部结构, 揭示不同滤层下暗管外包土工布淤堵类型, 为科学设置暗管滤料、保障暗管长效排水脱盐及提升低洼盐碱地土壤质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验于 2023 年进行。供试土壤取自宁夏石嘴山市平罗县前进农场($106^{\circ}31'E$, $38^{\circ}51'N$)。该区地处宁夏银北自流灌区, 地势低洼, 地下水位高, 土壤盐渍化严重, 是黄河中上游干旱—半漠境盐渍区。气候类型为温带大陆性气候, 年平均降水量、蒸发量分别为 173、1 755 mm, 降水稀少且分布不均, 主要集中在 7—9 月。土样以地表为基准分层(0~20、20~40、40~60 cm)采集, 剔除植物残根和石砾等杂物, 经风干、磨碎、过 2 mm 筛后备用。土壤盐分介于 3.35~10.02 g/kg, 盐分呈表聚特征, 表层含盐量最高, pH 低于 9.41(表 1)。0~60 cm 土层土壤黏粒(<0.002 mm)质量占比 3.56%, 粉砂粒(0.002~0.02 mm)质量占比 83.80%, 砂粒(0.02~2.0 mm)质量占比 12.64%, 土壤质地为粉砂质壤土。0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤 d_{90} 值分别为 224.3、259.6、323.5 μm (d_{90} 为土壤颗粒中 90% 的土粒均小于该值的土壤颗粒粒径)。

1.2 暗管排水模拟装置

以暗管埋深 150 cm、滤料厚 30 cm、回填土层厚

表 1 试验地土壤理化性质
Table 1 Soil physicochemical properties in experimental site

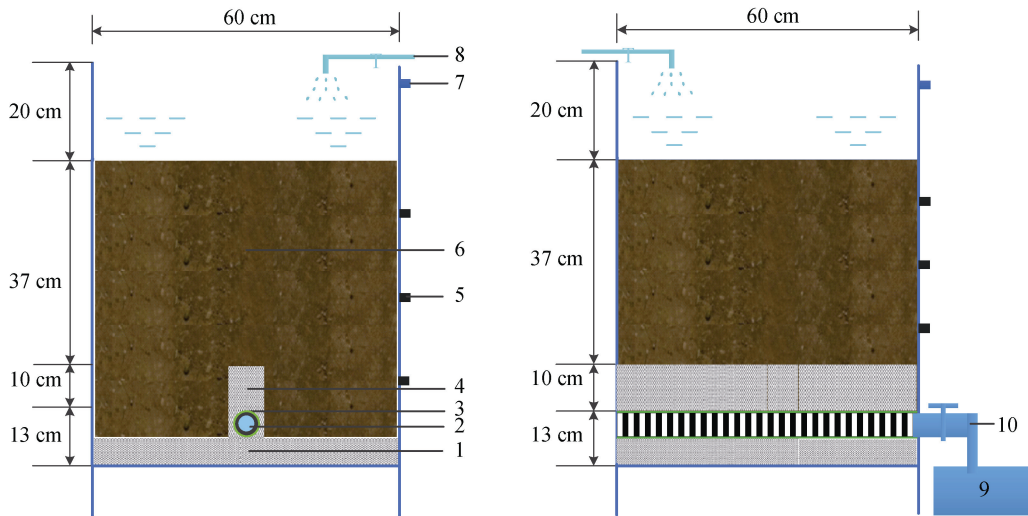
土层深度(cm)	土壤质地	pH	土壤含盐量(g/kg)	干容重(g/cm ³)
0~20	粉砂质壤土	9.34±0.02	10.02±1.14	1.45±0.03
20~40	粉砂质壤土	9.35±0.03	4.25±0.35	1.42±0.04
40~60	粉砂质壤土	9.41±0.02	3.35±0.27	1.48±0.02

112.5 cm、暗管外径 7.5 cm 的田间工程为参照，参考陶园等^[18]设计的暗管排水模拟试验，接近 1 : 3 的比例进行缩小，设计暗管排水模拟试验装置。装置由供水系统、渗流箱、集流箱三部分组成，其中渗流箱长×宽×高为 0.6 m×0.6 m×0.8 m(图 1)。为防止淋洗过程中沿壁出现优先流现象，试验装置(渗流箱)内层用砂纸打磨。试验装置中暗管埋深为 50 cm，滤料厚度为 10 cm，回填土厚度为 37 cm，暗管直径为 2.5 cm，四周的有机玻璃厚度为 8 mm，在距箱顶部 5 cm 处设有溢流口(避免

淋洗过程中积水层过高，并在槽壁设置 3 个取样口。

1.3 试验设计及过程

基于自主设计的暗管排水模拟装置，2023 年 5—9 月在宁夏银川市西夏区芦花镇园林场开展试验。在暗管统一套裹土工布的基础上，在暗管上方设置 4 种砂砾石滤层：T1，混合砂砾石滤料；T2，分层砂砾石滤料；T3，混合砂砾石组合秸秆滤料；T4，分层砂砾石组合秸秆滤料；CK，未设置任何滤料，直接回填土壤(图 2)。每个处理 3 个重复。



(1. 石英砂; 2. 暗管; 3. 土工布; 4. 滤料; 5. 取样口; 6. 土壤; 7. 溢流口; 8. 进水口; 9. 集水箱; 10. 暗管出水口)

图 1 试验模拟装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental simulation device

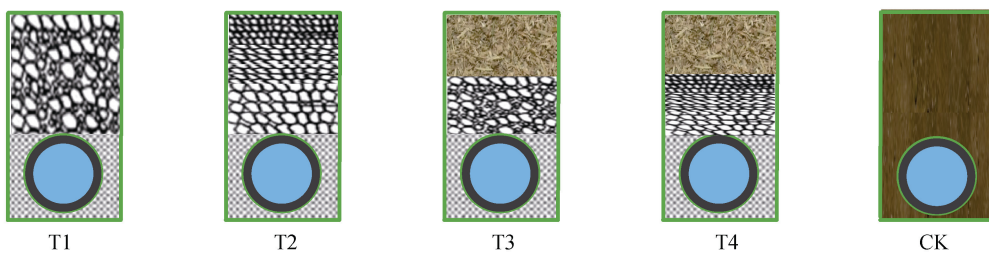


图 2 不同处理示意图

Fig. 2 Diagram of different treatments

试验时，首先在试验装置(渗流箱)底部铺设 5 cm 厚的石英砂，在石英砂反滤层上放置外包土工布的暗管(开孔率为 5%)；然后将土样分层装入渗流箱，并逐层夯实，回填土容重控制在 1.45 g/cm³，直至渗流

箱 60 cm 处。装土完成后放置过夜以达到平衡状态。试验中，淋洗定额参考胡顺军等^[23]在新疆盐碱土淋洗试验中所应用的公式进行计算，计算得淋洗定额为 6 750 m³/hm²，换算为每个渗流箱的淋洗定额为

0.20 m³。试验淋洗水源为地下井水, 水的矿化度为 1.20 g/L。2023 年 5 月 15 日开始淋洗试验, 淋洗分多次完成, 均采用淹灌的淋洗方式, 淋洗过程中保持水层深度 10 cm。2023 年 8 月 10 日完成淋洗试验(达到淋洗定额), 待土壤晾干后, 采集土样进行化验分析。

1.4 样品采集与测定

本研究通过测定渗流箱流失的土壤质量来反映暗管滤料反滤效果, 通过淤堵量和淤堵率来体现暗管滤料的防淤堵效果。试验前称量各处理的暗管土工布质量。试验中, 每天定时监测暗管排水量、排水矿化度, 并定期测定淋洗水矿化度, 以及收集通过暗管排出的土壤, 晾干和称量。试验结束后(即暗管停止排水时), 人工开挖土壤剖面, 取暗管上方及距暗管中心 5、15、25 cm 处两侧不同深度的土样, 测定土壤含水率、含盐量及暗管上方土壤粒径。每个土样取 3 次重复。最后, 取下暗管外包土工布进行称量, 并取迎水面土工布样进行扫描电镜观测。

1.5 测定项目及方法

土壤质量含水率采用烘干法测定; 按 1:5 土水质量比, 采用 DDS-307A 土壤电导率仪测定土壤电导率, 并换算成土壤全盐含量^[24]; 机械组成采用激光粒度仪(Microtrac, S3000)法测定; 灌水量采用流量计测定; 水的矿化度采用电导率仪测定; 排水时长采用秒表测定; 暗管排水量采用量筒测定。采用扫描电镜(Hitachi, TM4000plus)观测土工布结构。流失土壤质量为试验结束后透过土工布流失的土壤质量; 淤堵量为试验结束后吸附于土工布迎水面及滞留在土工布内部的土壤质量; 淤堵率为淤堵量与土工布原质量的比值。

1.6 数据处理与分析

暗管排水率、排盐率、脱盐率、排脱比、淤堵率计算公式如下^[25]:

$$v = (Q \times A) / t \quad (1)$$

$$R_w = (Q_w / L) \times 100\% \quad (2)$$

$$R_s = (Q_s / (S_0 + L_s)) \times 100\% \quad (3)$$

$$L_R = ((S_0 - S_t) / S_0) \times 100\% \quad (4)$$

$$R = R_s / L_R \quad (5)$$

$$w = ((m_t - m_0) / (m_0)) \times 100\% \quad (6)$$

式中: v 为暗管排水速率, cm/h; Q 为某一时长内的暗管排水量, cm³; t 为排水时长, h; A 为渗流槽横截面积, cm²; R_w 为暗管排水率, %; Q_w 为暗管排水总量, cm³; L 为淋洗水总量, cm³; R_s 为暗管排盐率, %; Q_s 为暗管排盐总量, kg; S_0 为淋洗前土壤盐分总

含量, kg; L_s 为淋洗水含盐量, kg; L_R 为土壤淋洗脱盐率, %; S_t 为淋洗后土壤盐分总含量, kg; R 为暗管排脱比; w 为淤堵率, %; m_t 为试验结束后土工布质量, g; m_0 为土工布初始的质量, g。

利用 Excel 2010 进行数据处理, 采用 Surfer 10 作等值线图。利用 SPSS19.0 软件进行显著性检验和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤水盐分布

淋洗结束后, 所有处理 0~20 cm 土层含水率均低于 20%, 土壤含水率随土层深度增加呈递增趋势, 在 40 cm 以下土层富集; 4 种滤层处理 0~60 cm 剖面含水率均低于 CK 处理, T1、T2 处理 0~60 cm 剖面含水率均低于 T3、T4 处理(图 3)。T3 和 T4 处理有秸秆滤料, 而秸秆滤料孔隙较大, 土壤颗粒特别是黏粒更容易进入造成滤料堵塞, 导致排水减缓。土壤盐分随土层深度增加呈递增趋势, 4 种滤层处理 0~20 cm 土层盐分均低于 1.2 g/kg, 而 CK 处理 0~20 cm 土层盐分为 1.8~2.6 g/kg(图 4)。T2 处理土壤剖面盐分最低, 盐分累积在 40 cm 以下土层。在暗管顶部剖面土壤中, T3、T4、CK 处理的盐分等值线在 30 cm 深度处开始形成“脊”, 表明此处盐分向下的运移开始受阻; 在 30 cm 深度处, CK 和 T3、T4 处理的土壤含盐量分别为 3.0、1.5、1.5 g/kg, 表明砂砾石组合秸秆滤料处理对土壤剖面盐分的淋洗效果明显优于未设置任何滤料的 CK 处理。所有处理表层盐分均较低, 靠近暗管区域的土壤盐分含量均较高, 这是由于淋洗初期水流较快, 盐分随水流向排水管迁移, 但随着土壤颗粒在暗管附近富集, 产生一定程度的淤塞或淤堵, 影响了排水, 导致盐分在暗管附近累积。

2.2 不同处理下土壤淋盐效果

试验前供试土壤盐分含量超过 3 g/kg, 渗流箱 0~60 cm 土壤盐分总量为 3.42 kg。淋洗结束后, CK、T1、T2、T3、T4 处理的土壤盐分含量分别为 1.97~3.35、1.09~1.42、1.07~1.35、1.03~1.35、1.03~1.35 g/kg, 0~60 cm 土壤盐分总量分别为 1.03、0.46、0.44、0.43、0.45 kg(表 2); 相比 CK 处理, T1、T2、T3、T4 处理的盐分总量分别降低 55.3%、57.3%、58.3%、56.3%。此外, 淋洗后, T1~T4 处理在 20~40、40~60 cm 土层土壤盐分差异不显著, 0~20 cm 土层 4 个处理及 CK 处理均明显低于淋洗前, 表明淋洗对表层土壤的脱盐效果最明显。

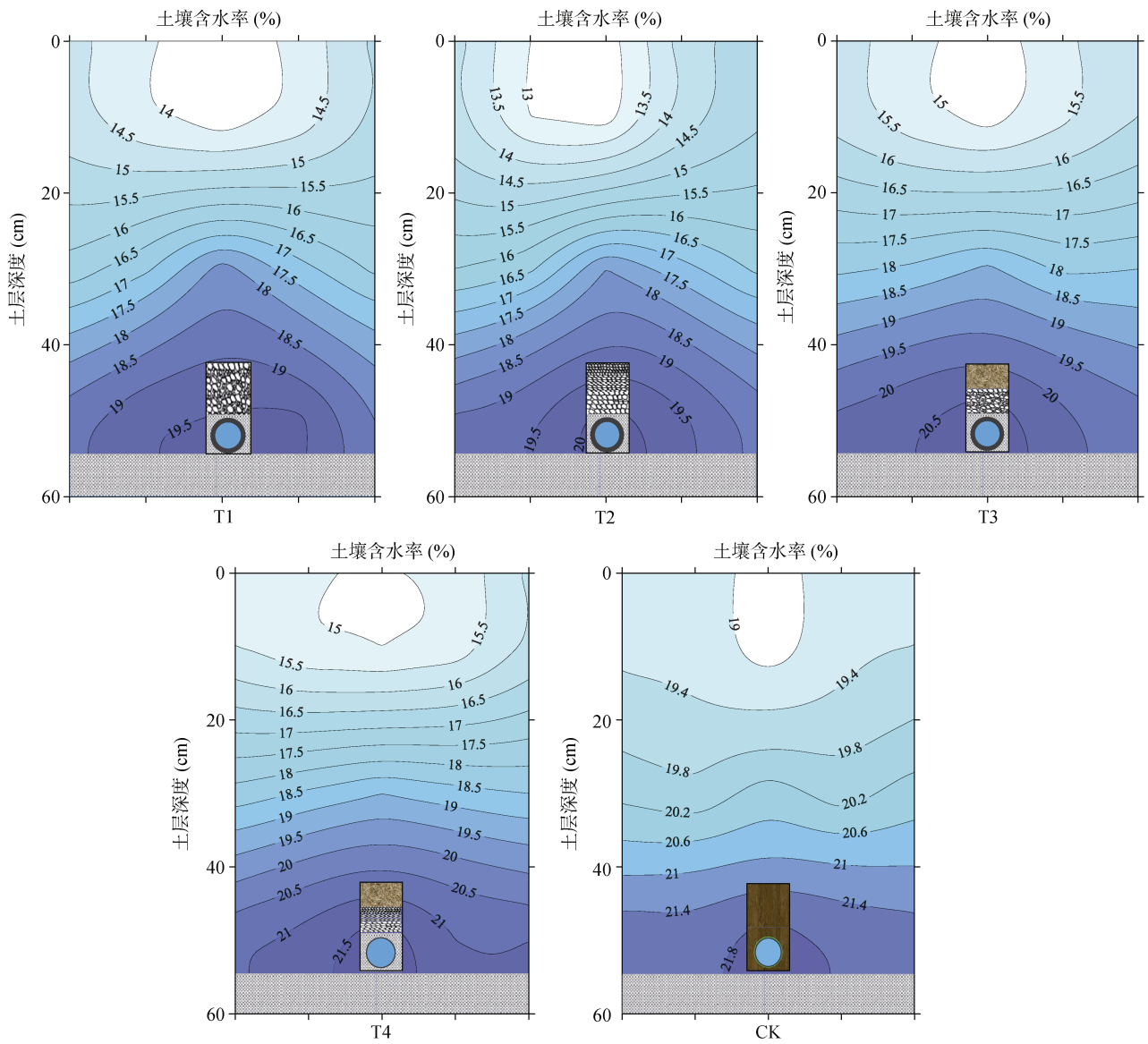
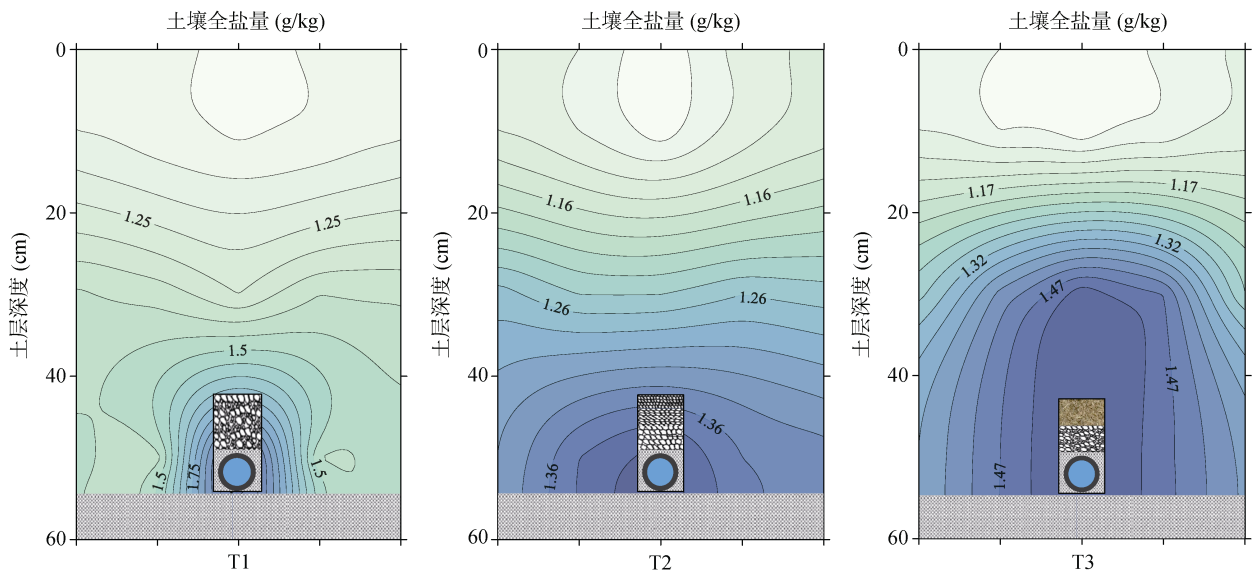


图 3 不同处理下土壤水分分布
Fig. 3 Soil moisture distributions under different treatments



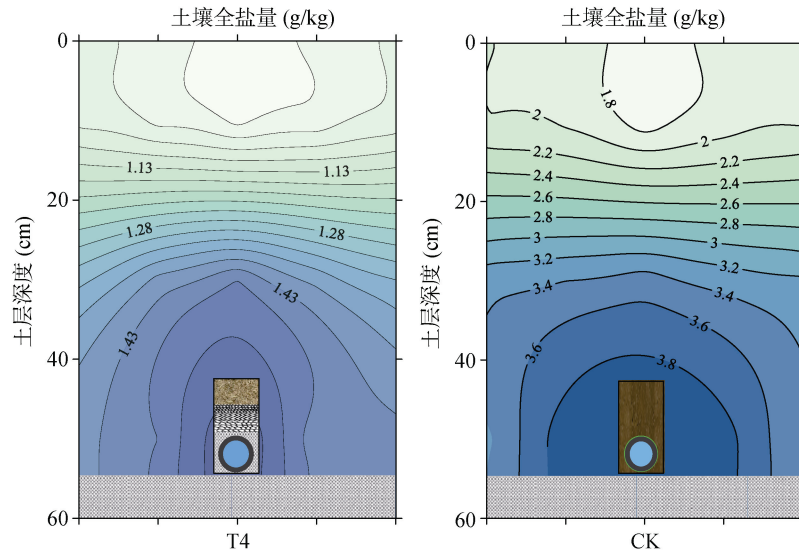


图 4 不同处理下土壤盐分分布

Fig. 4 Soil salinity distributions under different treatments

表 2 不同处理对土壤盐分的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil salinity

处理	土层深度(cm)	含盐量(g/kg)	0~60 cm 总盐(kg)
原土	0~20	10.02±1.14	3.42±0.15
	20~40	4.25±0.35	
	40~60	3.35±0.27	
CK	0~20	1.97±0.23a	1.03±0.04a
	20~40	3.33±0.22a	
	40~60	3.35±0.07a	
T1	0~20	1.09±0.11b	0.46±0.01b
	20~40	1.37±0.14b	
	40~60	1.42±0.05b	
T2	0~20	1.07±0.08b	0.44±0.02b
	20~40	1.26±0.09b	
	40~60	1.35±0.13b	
T3	0~20	1.03±0.09b	0.43±0.03b
	20~40	1.27±0.13b	
	40~60	1.35±0.10b	
T4	0~20	1.01±0.07b	0.45±0.03b
	20~40	1.31±0.19b	
	40~60	1.41±0.07b	

注: 同列不同小写字母表示同一土层不同处理之间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同处理下暗管排盐效率

试验时, 每个渗流箱的淋洗水量均为 200 L (0.20 m^3), 淋洗水矿化度均为 1.2 g/L。CK、T1、T2、T3、T4 处理的总排水量分别为 86.5、111.8、112.6、99.9、104.9 L(表 3), CK 处理暗管总排水量最低, T2 处理最高。淋洗初期, 暗管排水矿化度较高, 在 24~34 g/L, 而后排水矿化度降低至 2.5 g/L 以下。CK、T1、T2、T3、T4 处理总的排盐量分别为 0.39、0.96、0.98、0.96、0.97 kg。T1~T4 处理的土壤剖面脱盐率均超过 65%, CK 处理仅为 27.69%。CK 处理的排水速率显著低于 T1~T4 处理 ($P<0.05$), 其中 T2 处理的排水速率最高。T1~T4 处理的排水率、排盐率、脱盐率均显著高于 CK 处理, 但 4 个处理之间差异不显著。T1 和 T2 处理排水速率高于 T3、T4 处理。CK 处理未设置暗管滤料, 易堵塞, 导致排水速率低, 总排水量小, 排盐率也低, 虽然有较高的排脱比, 但淋洗脱盐率较低, 低于 30%, 排盐效果不佳。暗管外包砂砾石分层、混合及其与秸秆组合的不同滤层处理, 兼顾了过滤防堵塞和排水作用, 排盐效果好。

2.4 不同处理下土工布淤堵及保土效果

经过一个试验周期的淋洗, 除 CK 处理外, T1~T4

表 3 不同处理下暗管的排水率及排盐率

Table 3 Drainage rates and salt discharge rates of subsurface pipes under different treatments

处理	总排水量(L)	排水速率(cm/h)	排水率(%)	排盐率 R_s (%)	脱盐率 L_R (%)	暗管排脱比(R_s/L_R)
CK	86.5±6.0c	0.018±0.003c	43.27±2.08b	33.14±6.05b	27.69±2.80b	1.20±0.07a
T1	111.8±4.3a	0.034±0.002a	55.90±2.14a	45.07±7.24a	67.51±0.56a	0.67±0.11b
T2	112.6±3.1a	0.038±0.003a	56.32±1.55a	46.86±9.76a	69.24±1.44a	0.68±0.13b
T3	99.9±11.6b	0.025±0.001b	49.97±5.78a	44.04±2.88a	69.41±2.06a	0.64±0.05b
T4	104.9±8.2ab	0.030±0.002ab	52.43±4.11a	41.44±2.86a	68.32±2.00a	0.61±0.03b

注: 同列不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P<0.05$); 下同。

处理的土壤流失量均超过 160 g，其中 T2 处理的土壤流失量最多，T1、T2、T3、T4 处理土壤流失量相比 CK 处理分别增加 122.4%、137.4%、80.3%、98.1%(表 4)。所有处理均出现不同程度的淤堵，其中 CK 处理淤堵率最高(超过 80%)，T2 处理的淤堵率最低(35.51%)，T1、T2、T3、T4 处理淤堵率相比 CK 处理分别降低 47.1%、56.4%、31.7%、36.3%。T2 处理的淤堵率显著低于 T3 和 T4 处理($P<0.05$)。与原土相比，淋洗结束后 T1~T4 处理滤料上方土壤黏粒、粉粒含量下降，而砂粒含量上升，而 CK 处理的结果则相反(表 5)。CK 处理滤料上方土壤 d_{90} 值低于原土，而 T1~T4 处理均高于原土，其 d_{90} 值相比原土分别提高 12.5%、14.0%、11.0%、10.5%。T2 处理淤堵率低，且滤料上方土壤 d_{90} 值显著高于 T3 和 T4 处理($P<0.05$)，表现出良好的反滤性能。砂砾石分层滤料处理土壤细颗粒易通过土工布进入排水管导致土壤流失，砂砾石混合组合秸秆滤料处理保土效果好，但土壤颗粒易滞留在土工布纤维结构中，导致淤堵率略高，超过 50%(表 4)，砂砾石混合、分层的滤料处理兼顾了保土和防堵作用。

表 4 不同处理土壤流失及土工布淤堵情况

Table 4 Soil loss and geotextile siltation under different treatments

处理	流失土壤质量(g)	土工布原质量(g)	淤堵后质量(g)	淤堵率(%)
CK	89.50±2.91c	27.49±1.11a	49.84±2.49a	81.28±1.74a
T1	199.03±4.02ab	27.72±1.32a	39.60±0.95bc	42.96±3.53c
T2	212.43±6.00a	27.42±1.44a	37.16±1.98c	35.51±2.93c
T3	161.37±6.24b	27.45±1.52a	42.59±0.60b	55.48±9.07b
T4	177.27±8.60b	26.41±0.79a	40.05±0.78bc	51.71±3.914bc

表 5 滤料上方土壤粒径分析

Table 5 Soil particle size distributions above filter materials

处理	黏粒(%)	粉粒(%)	砂粒(%)	$d_{90}(\mu\text{m})$
原土	3.56±0.11b	83.80±1.45a	12.64±0.26c	259.6±10.65c
CK	9.57±0.87a	81.73±0.45ab	8.70±0.52d	235.67±11.47d
T1	3.02±0.07b	75.47±1.39c	21.51±1.40a	292.13±1.18a
T2	2.99±0.05b	73.66±1.85c	23.35±1.85a	295.90±3.01a
T3	3.17±0.15b	78.32±0.79b	18.51±0.64b	288.25±4.35b
T4	3.27±0.17b	77.17±0.50b	19.56±0.63ab	286.94±11.59b

2.5 不同处理下土工布的淤堵类型

在水流作用下，土壤颗粒发生移动，一部分穿过土工布进入排水系统，另一部分被土工布截留。被截留的土壤颗粒以淤堵和淤塞两种形式存在^[26]。T1~T4 处理为土工布内部淤塞，即细土颗粒滞留在土工布纤维结构中，导致其透水面积减小；CK 处理为土工布迎水面淤堵，即土壤颗粒聚集在土工布迎水面形成一层透水性较低的滤饼。但试验结束时，T1~T4 处理下土壤颗粒并未完全堵塞土工布(图 5)。

3 讨论

本试验中，砂砾石分层滤料处理的淤堵率最低，排水速率、排盐率高，总排水量最大，盐分淋洗效果最好；砂砾石与秸秆组合滤料处理淤堵率高于 50%，导致排水速率低、排盐率低，总排水量小，剖面盐分淋洗效果不如砂砾石混合和分层处理。这是由于秸秆滤料孔隙较大，土壤颗粒特别是黏粒更容易进入滤料造成堵塞所致。有学者通过改进暗管外包滤层结构、滤层材料等措施，提高暗管排水能力^[21-22]，但一些技

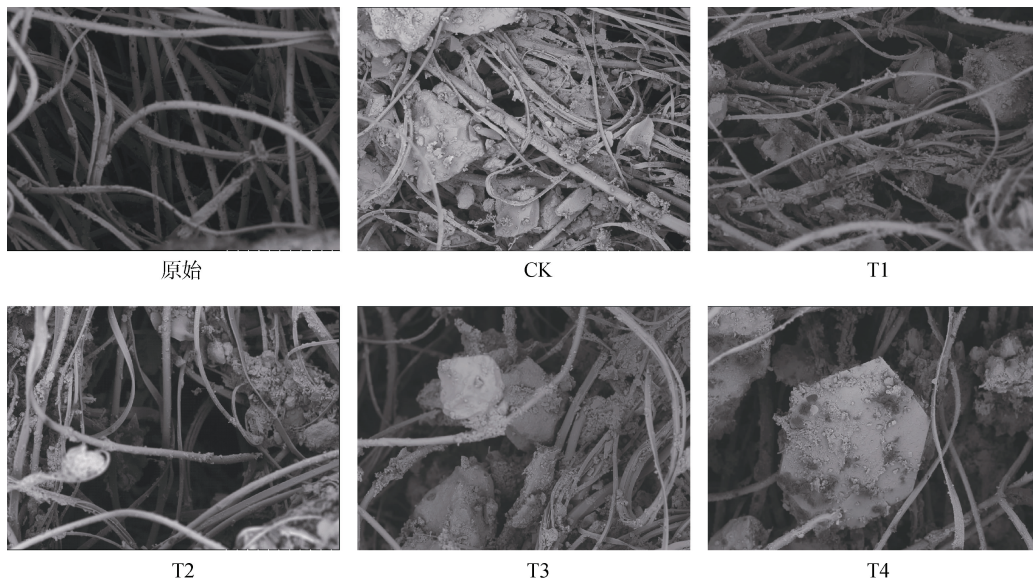


图 5 土工布电子显微镜扫描图
Fig. 5 Electron microscope scanning patterns of geotextiles

术因缺乏配套的机械设备或成本较高等原因,目前只停留在模拟试验中,尚未大面积地在田间实践中应用。细砂粒和细碎石混合的砂石滤料孔隙适中,能形成稳定的过滤层,使土壤剖面水分出现分层现象,提高亚表层土壤保水率,抑制返盐^[27]。本试验也证实,砂砾石滤料能形成良好的过滤层,促进暗管排盐。有研究表明,暗管外包滤料能通过土壤颗粒筛选的方式,将暗管上方土壤特征粒径 d_{90} 值提升 20% 以上,诱导暗管上方形成高透水性土壤骨架^[17,28]。本试验也证实,砂砾石及其与秸秆组合的滤料能将上方土壤特征粒径 d_{90} 值提升 10% 以上,滤料上方土壤的黏粒、粉粒含量下降,砂粒含量上升,诱导周围土壤形成由砂粒等粗颗粒组成的具有高渗透性的土壤透水骨架。有学者^[29]指出,纺黏聚丙烯土工织物表面光滑,与土壤接触后易产生成片细颗粒“薄饼”,经过长时间应用,土壤中细小的颗粒会淤积在滤层内,造成机械淤堵,从而影响暗管排水效果。本试验中,暗管外包土工布未设置滤料的对照处理试验结果也证实了这一点。

本试验中,砂砾石组合秸秆滤料处理下土工布迎水面出现一定程度淤堵,这是由于秸秆孔隙不均匀,导致暗管滤料对上方土壤颗粒的筛选作用发挥不明显,未能形成高透水性的土壤骨架结构,导致不同粒径的土壤颗粒进入秸秆滤料并最终滞留在滤料及土工布中。本试验扫描电镜结果显示,未设置滤料处理在土工布迎水面上形成了明显的滤饼层,而滤饼层的存在会持续吸纳随水流动的更小粒径的土壤颗粒,随时间推移滤饼厚度会逐渐增加,导致透水性降低;砂砾石混合和分层滤料处理土壤颗粒滞留在土工布纤维结构中,土壤颗粒并未完全堵塞土工布,可保障暗管长效排盐。

4 结论

1) 砂砾石分层处理暗管的排盐率最高,约为 47%。暗管未外包滤料产生的淤堵是土工布引起的,即在土工布迎水面会形成致密的滤饼层;砂砾石及其与秸秆组合的滤料产生的淤塞是土工布自身淤塞,即土壤颗粒滞留在土工布纤维结构中,但土壤颗粒并未完全堵塞土工布结构。

2) 砂砾石混合、砂砾石分层、砂砾石混合组合秸秆、砂砾石分层组合秸秆 4 种滤层能将暗管滤料上方土壤特征粒径 d_{90} 值分别提升 12.5%、14.0%、11.0%、10.5%,有效发挥滤料拦截粗颗粒放行细颗粒的作用,诱导周围土壤形成由砂粒等粗颗粒组成的

具有高渗透性的土壤透水骨架。砂砾石混合、砂砾石分层滤料处理的淤堵率低且滤料上方土壤 d_{90} 值高于其他处理,表现出良好的反滤性能。因此,暗管外包砂砾石滤料更适宜于治理宁夏银北盐碱土。

参考文献:

- [1] 王全九,邓铭江,宁松瑞,等. 农田水盐调控现实与面临的问题[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 139–147.
- [2] Cuevas J, Daliakopoulos I N, del Moral F, et al. A review of soil-improving cropping systems for soil salinization[J]. *Agronomy*, 2019, 9(6): 295.
- [3] Minhas P S, Ramos T B, Ben-Gal A, et al. Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 227: 105832.
- [4] James O. History of the roles of gypsum in soil reclamation and establishment of SAR/EC water quality guidelines[R]. The First IUSS Conference on Sodic Soil Reclamation, Changchun, Jilin, 2021.
- [5] 杨劲松,姚荣江,王相平,等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10–27.
- [6] Liu T, Wang B T, Xiao H J, et al. Differentially improved soil microenvironment and seedling growth of *Amorpha fruticosa* by plastic, sand and straw mulching in a saline wasteland in northwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 122: 126–134.
- [7] Askri B, Khodmi S, Bouhlila R. Impact of subsurface drainage system on waterlogged and saline soils in a Saharan palm grove[J]. *Catena*, 2022, 212: 106070.
- [8] Soe Y M, Shinogi Y, Taniguchi T. Changes in certain paddy soil properties under perforated sheet pipe as subsurface shallow drainage[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 2022, 56(1): 59–66.
- [9] Heng T, Feng G, Yang L L, et al. Soil salt balance in a cotton field under drip irrigation and subsurface pipe drainage systems[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(6): 4875–4888.
- [10] Wang X, Shen J L, Fan L Q, et al. Research on salt drainage efficiency and anti-siltation effect of subsurface drainage pipes with different filter materials[J]. *Water*, 2024, 16(10): 1432.
- [11] Chen G, Wei Z M, Liu H. Study on soil desalination process of saline-alkaline grassland along the Yellow River in western Inner Mongolia under subsurface drainage[J]. *Sustainability*, 2022, 14(21): 14494.
- [12] 荣臻,王少丽,郝瑞霞,等. 宁夏银北灌区排水暗管土工布外包料透水与防淤堵性能[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 68–75.
- [13] Jafari Talukolae M, Darzi Naftchali A, Zare Parvariji L, et al. Investigating long-term effects of subsurface drainage on soil structure in paddy fields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177: 155–160.
- [14] Mante A A, Sri Ranjan R, Bullock P. Subsurface drainage for promoting soil strength for field operations in southern

- Manitoba[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 261–268.
- [15] Abedi-Koupai J, Ansari S, Mostafazadeh-Fard B, et al. Experimental study and numerical simulation of soil water and salt transport under dry drainage conditions[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(4): 89.
- [16] 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.
- [17] Tian F, Miao Q F, Shi H B, et al. Study on water and salt transport under different subsurface pipe arrangement conditions in severe saline-alkali land in Hetao irrigation district with DRAINMOD model[J]. Water, 2023, 15(16): 3001.
- [18] 陶园, 王少丽, 许迪, 等. 改进暗管排水结构型式对排水性能的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 113–118, 179.
- [19] 秦文豹, 李明思, 李玉芳, 等. 滴灌条件下暗管滤层结构对排水、排盐效果的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 80–85.
- [20] 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.
- [21] 鲍子云, 仝炳伟, 张占明. 宁夏引黄灌区暗管排水工程外包料应用效果分析[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 47–50.
- [22] 李杰, 王红雨, 马俊毅, 等. 基于渗流槽试验的吸附性外包滤料改善暗管排水脱盐效果[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 121–130.
- [23] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东. 基于土壤饱和入渗理论计算盐碱地冲洗定额[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 563–567.
- [24] 王旭, 樊丽琴, 张永宏, 等. 造林树木对宁夏盐碱土水盐分布的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 211–217.
- [25] 陈名媛, 黄介生, 曾文治, 等. 外包土工布暗管排盐条件下水盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2020, 36(2): 130–139.
- [26] 张大伟, 贾忠华, 贺园春, 等. 扬州沿运灌区暗管排水土工布外包滤料的水力性能试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(1): 38–43.
- [27] 刘嘉斌, 田军仓, 张萌, 等. 暗管排水砂滤料对稻田盐碱地水盐运移规律的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(11): 114–121.
- [28] 胡玲玲, 杨树青, 梁志航, 等. 河套灌区下游排水暗管外包料筛选试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(4): 141–148.
- [29] 梁志航. 河套灌区不同土质下排水暗管外包材料的筛选研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.

(责任编辑: 于 飞)