

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.01.012

霍宏鑫, 杨劲松, 姚荣江, 等. 复合隔层对河套灌区盐碱土水盐运移的影响. 土壤, 2024, 56(1): 90–96.

复合隔层对河套灌区盐碱土水盐运移的影响^①

霍宏鑫^{1,2}, 杨劲松^{1*}, 姚荣江¹, 谢文萍¹, 王相平¹, 张璐¹

(1 土壤与农业可持续发展重点实验室(中国科学院), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 河套灌区盐渍农田分布广、肥力质量差、生产力水平低, 严重威胁粮食安全。为研究秸秆-保水剂复合隔层对河套灌区盐碱土的控盐及节水效果, 通过室内土柱模拟试验, 设置常规灌溉水量(10 L)和节水 20% 灌溉水量(8 L)2 种灌溉水量下的 2 种隔层(秸秆隔层和复合隔层)以及对照组处理, 对比研究了复合隔层与秸秆隔层在节水条件下对土壤水分入渗过程、蒸发过程以及盐分变化规律的影响。研究表明: 入渗过程中, 两种隔层均能延缓水分入渗, 提高淋盐效果, 相比秸秆隔层, 复合隔层处理水分入渗时间延缓 14.47%, 对 0~40 cm 土层淋盐效果提升 34.86%。蒸发过程中, 复合隔层能够通过内部保水剂缓慢释水, 对 20~40 cm 土层补水, 其 20~40 cm 土层含水率较秸秆隔层提升 10.90%~90.61%。节水 20% 的条件下, 复合隔层处理在 0~40 cm 土层的灌溉淋盐效果及蒸发过程中的保水抑盐效果优于未进行节水处理的对照组。综合来看, 秸秆-保水剂形成的复合隔层其淋盐效果、保水抑盐效果均优于秸秆隔层, 在节水条件下仍具有较好的保水控盐效果。本研究可为河套灌区节水型盐碱障碍消减研究提供依据和参考。

关键词: 河套灌区; 隔层; 节水控盐

中图分类号: S156.4 **文献标志码:** A

Effect of Composite Interlayer on Soil Water-Salt Transport in Hetao Irrigation District

HUO Hongxin^{1,2}, YANG Jinsong^{1*}, YAO Rongjiang¹, XIE Wenping¹, WANG Xiangping¹, ZHANG Lu¹

(1 Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Saline farmland in Hetao irrigation area is widely distributed with poor fertility and low productivity, which seriously threatens food security. In order to study the salt-control and water-saving effects of straw-water-retaining agent composite layer on saline-alkali soil in Hetao irrigation district, an indoor soil column simulation experiment was conducted with straw and composite layers under conventional (10 L) and 20% water-saving (8 L) irrigation water. Soil water infiltration, evaporation and salinity variation were determined and compared under different treatments. The results showed that both layers delayed water infiltration and improved salt leaching effect during infiltration process compared with CK (no interlayer and 10 L irrigation). Compared with straw layer, the composite one delayed water infiltration time by 14.47%, and increased salt leaching effect by 34.86% in 0–40 cm soil layer. In the evaporation process, the composite layer slowly released water to 20–40 cm soil layer through internal water retaining agent, and soil moisture in 20–40 cm layer was increased by 10.90%–90.61% compared with the straw layer. Under 20% water saving, the above effects in 0–40 cm soil were better for the treatments with composite layers than CK. In summary, the composite barrier of straw and water retaining agent has better effect on water and salt control than straw barrier even under the condition of water saving, which provide-s basis and reference for the reduction of water-saving saline-alkali barrier in Hetao irrigation district.

Key words: Hetao irrigation district; Interlayer; Water saving salt control

河套灌区是我国重要的商品粮油基地, 由于灌排不合理等问题, 灌区内盐碱障碍突出, 盐渍化耕地面积达 $3.94 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 占全区耕地面积的 68.7%^[1]。盐

渍农田肥力质量差、生产力水平低, 严重威胁粮食安全^[2]。运用综合措施改善盐碱农田土壤理化性质, 提高其土壤质量和生产力水平, 对扩增耕地资源、保障

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900602, 2021YFC3201201)和国家自然科学基金项目(41977015)资助。

* 通讯作者(jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 霍宏鑫(1998—), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事节水型盐碱障碍消减方面研究。E-mail: huohongxin@issas.ac.cn

粮食安全具有重要意义^[3]。另外,河套灌区地处干旱、半干旱地区,降雨少、蒸发强烈,农业生产极度依赖引黄灌溉^[4],灌区引黄面积达 $7.3 \times 10^5 \text{ hm}^2$,没有灌溉就没有灌区农业^[5]。然而,随着黄河水资源日益短缺^[6-7],灌区水资源供需矛盾日益突出,探索节水型盐碱障碍治理,对缓解灌区用水矛盾、改良灌区盐渍农田土壤均具有重要意义。

盐渍土水盐调控遵循“盐随水来,盐随水去”的规律,主要为土壤水文过程^[8]。在地表下一定深度埋设秸秆隔层,可以抑制土壤盐分随水分的上移,延缓水分下渗,增强盐分淋洗效果,进而达到改善盐渍土壤水盐运移,优化耕层土壤盐分分布,改善根区土壤环境条件的目的^[9],是消减河套灌区盐碱障碍的重要途径之一^[10-11]。目前对秸秆隔层消减盐碱障碍的研究主要集中在隔层埋设深度^[12]、隔层厚度^[13-14]、隔层秸秆形态^[15]等关键参数,以及秸秆隔层的节水效果^[16-18]。然而,秸秆隔层会切断土壤毛细管,导致耕层土壤补水较困难。以往的研究中将地膜和秸秆隔层配套施用以达到保水目的^[19]。但地膜不易回收,残膜会破坏土壤结构、抑制作物根系生长,导致土壤物理性能和根系水肥吸收能力下降^[20]。保水剂是一种有机高分子聚合物,能够大量吸收并缓慢释放水分,同时促进土壤团聚体形成,改善土壤理化性状^[21-22],是节水农业技术体系中的重要组成部分^[23]。因此考虑在秸秆隔层中添加适量保水剂形成复合隔层,以优化隔层关键性能,提升隔层缓渗淋盐和抑盐效果,同时解决耕层土壤补水难的问题。

本研究基于室内土柱试验,通过连续监测土壤剖面水盐动态变化,研究复合隔层对水盐运动的影响,并探究其在节水条件下的水盐调控优化效果,以期探明复合隔层调控下水盐运移规律,为研发节水型盐碱障碍消减技术提供基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域位于内蒙古巴彦淖尔五原县($108^{\circ}11'E$, $41^{\circ}04'N$),平均海拔 1 025 m。该地区属温带大陆性季风气候,多年平均气温 9.24°C ,平均降水量 177.66 mm,多年平均日照时数 3 176.41 h,气候特点干燥多风、气温多变、光照充足、蒸发强烈、降雨少而集中、昼夜温差大、无霜期短。灌区通常于 4 月中下旬、10 月下旬分别进行一次灌溉(春灌、秋浇),起到淋盐、补墒的作用。

1.2 试验设计

试验样品取自五原县农田 0~30 cm 土层,在室温(25°C)下风干,碾碎后过 2 mm 筛,去除粗颗粒和石块。土壤质地为粉砂质黏壤土(黏粒、粉粒、砂粒的含量分别为 20.7%、53.6%、25.7%)。土壤全盐含量 11.76 g/kg ,电导率 4.89 dS/m ,pH 8.78, Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 含量分别为 5.91、0.14、0.15、0.36、4.04、1.13、1.52 cmol/kg 。盐土分类属于硫酸盐-氯化物盐碱土,用环刀法装土水饱和后烘干测得饱和含水率为 38.40%,用威尔克斯法测得田间持水量为 25.40%,饱和导水率为 12.75 cm/d 。

试验设置 5 个处理:CK(无隔层、常规灌水量),JG(秸秆隔层、常规灌水量),JS(复合隔层、常规灌水量),JGS(秸秆隔层、80% 常规灌水量),JSS(复合隔层、80% 常规灌水量)。常规灌水量为 10 L,80% 常规灌水量为 8 L。隔层埋深均为 40 cm,厚度均为 5 cm,密度约 0.1 g/cm^3 。每个土柱秸秆用量为 157 g,约合 50 t/hm^2 。秸秆为五原县当季玉米秸秆,在田间经机器打碎,长度约为 3~5 cm。复合隔层在玉米秸秆的基础上按秸秆与保水剂质量比 30:1 的比例添加保水剂,充分混合后装填。保水剂采用胜利油田长安控股集团有限公司生产的沃特保水剂,主要成分为聚丙烯酰胺共聚体和凹凸棒的混合物,颗粒大小 0.5~1 mm,吸水倍率(去离子水)为 300~500 g/g。试验在有机玻璃柱(直径 20 cm,高度 120 cm)内进行。玻璃管侧壁每隔 10 cm 高度均匀设置 4 个取样孔,试验时用塞子塞住。管底铺设 5 cm 厚的石英砂和一层滤网作为反滤层,防止土壤颗粒随水流流失,并保证水分入渗通畅。之后,将过 2 mm 筛的土样分层倒入玻璃柱中,每层 5 cm,密度为 1.4 g/cm^3 。每层填土后搅拌该土层表面,再加入下一层土壤,防止分层。土层总高度为 90 cm,设有隔层的土柱填土至 45 cm 时,按设定密度填入隔层材料,厚度为 5 cm,然后继续填土至 90 cm。

土柱装填好后,进行垂直一维土柱积水入渗试验。将各土柱设置水量一次性灌入土柱,记录水面下降的速度以及土柱内湿润锋运移的速度。待土表无积水时,结束入渗试验,用塑料薄膜将土柱封住,防止水分自然蒸发。静置 48 h 后,开始蒸发试验,在土柱底部接入马氏瓶,模拟 90 cm 的地下水位,地下水矿化度设置为 2 g/L 。蒸发过程中,利用 250 W 红外灯在每个土柱上方 30 cm 处定时照射,并设置同样直径的蒸发皿,记录土柱蒸发量 and 水面蒸发量;在第 0、10、20、30、50、90 天时通过取样孔对不同土层取

样, 取样位置分别为距土表 5、15、25、35、55、65、75、85 cm 处, 每次取样位置不重复。

1.3 样品测定与方法

土壤含水率采用铝盒烘干法测定, 将土样在 105 °C 的烘箱中烘干直至恒重。土壤含盐量通过测定电导率求得, 在试验区采集多个土壤样品, 测定土壤电导率值 $EC_{1:5}$ (土水质量比为 1:5), 土壤含盐量 $TS(g/kg)=2.38 \times EC_{1:5} + 0.11$ 。

土壤脱盐率的计算公式为:

$$N = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100\%$$

式中: N 为脱盐率, %; S_1 为土壤盐分初始值, g/kg; S_2 为灌溉后土壤盐分终值, g/kg。

2 结果与分析

2.1 复合隔层及节水条件对土壤入渗特性的影响

灌溉过程中土壤水分入渗对土壤水盐分布有重要影响, 湿润峰是入渗过程中明显的干湿土交界面, 能够直观反映土壤水分入渗特征^[22]。总体来看, 垂直一维入渗过程中, 隔层的存在降低了湿润峰的运移速度, 而复合隔层的缓渗效果优于秸秆隔层。从不同处理水分入渗过程中湿润峰深度随时间变化情况(图 1)可以看出, 灌溉水入渗过程中, 隔层各处理总用时均高于对照处理, 常规灌溉组 CK、JG、JS 湿润峰到达底部的时间分别为 70、76、87 h, JG 和 JS 分别较 CK 延长了 8.57%、24.29%。在 0~20 cm 土壤运移的前 3 h 内, 各处理与对照处理湿润峰运移速度基本相同, 曲线重叠性较高。随后, 隔层处理的湿润峰运移速度减缓, CK 在 12 h 时到达 40 cm 处, 隔层处理在约 15 h 时到达 40 cm 隔层埋设处。节水组的 JGS 和 JSS 在 0~40 cm 土层入渗时, 湿润峰速度与常规灌溉组差异不明显; 越过隔层后, CK、JGS、JSS 在 50~60 cm 土层的速度分别为 1.28、0.88、0.80 cm/s, 速度下降较为明显, 说明节水会使湿润峰入渗到深层时速度减缓, 对其在上层土壤运移时影响不大。总体来看, 灌溉水入渗过程中, 隔层处理会减缓水分入渗速度, 复合隔层处理缓渗效果较秸秆隔层更优, 节水处理会使水分在深层土壤入渗时速度减慢。

2.2 复合隔层及节水条件对入渗后土壤水盐分布的影响

入渗结束后, 对于 0~20 cm 土层, 常规灌溉组 CK、JG、JS 的含水率均随深度升高, 而节水组 JGS、JSS 含水率则随深度下降(图 2A)。CK、JG、JS、JGS、JSS 处理的平均含水率分别为 26.66%、32.05%、

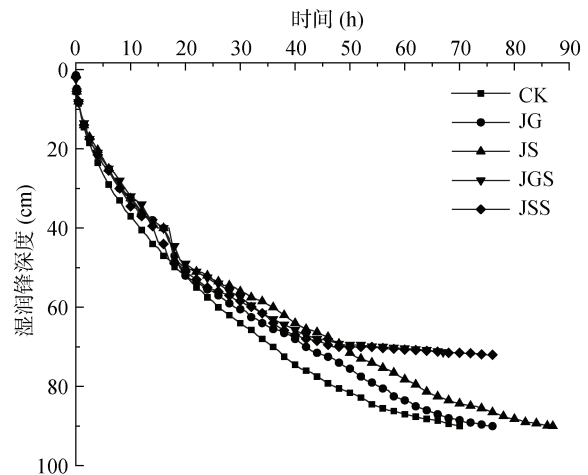


图 1 不同处理下水分入渗特征

Fig.1 Water infiltration characteristics under different treatments

30.87%、31.07%、33.20%, JSS 的平均含水率最高, JG 次之, CK 处理最低。对于 20~40 cm 土层, 各处理含水率均随深度升高, CK、JG、JS、JGS、JSS 处理的平均含水率分别为 28.84%、32.37%、32.27%、32.53%、34.14%, JSS 处理在 20~40 cm 的平均含水率明显高于其他处理。整体来看, CK、JG、JS、JGS、JSS 处理在 0~40 cm 土层的平均含水率分别为 27.75%、32.21%、31.56%、31.80%、33.67%, 隔层处理均高于对照处理, 可见, 隔层处理能提高灌溉后上层土壤含水率。另外, 常规灌溉组 JS 的平均含水率略低于 JG, 但节水条件下 JSS 的平均含水率高于 JGS, 说明灌溉水量的减少对秸秆隔层保蓄上层土壤水分的能力影响较大, 节水条件下复合隔层更有利于在灌溉过程中保蓄上层土壤水分。

从含盐量来看, 各处理含盐量整体上随土层深度增加(图 2B)。CK、JG、JS、JGS、JSS 处理 0~20 cm 土层平均含盐量分别为 0.76、0.55、0.54、0.74、0.63 g/kg, 脱盐率分别为 93.54%、95.32%、95.41%、93.71%、94.64%。常规灌溉下, JG 和 JS 的脱盐率均高于 CK, 且 JS 的脱盐率高于 JG。节水灌溉下, JGS 和 JSS 脱盐率分别低于 JG、JS, 表明节水条件会降低脱盐率, 但 JSS 脱盐率高于对照, 说明复合隔层能够提高灌溉水淋盐效率, 在节水 20% 的条件下仍能达到常规灌溉下对照组的脱盐效果。CK、JG、JS、JGS、JSS 处理在 20~40 cm 土层平均含盐量分别为 2.83、2.91、1.99、3.75、2.71 g/kg, 脱盐率分别为 75.97%、75.22%、83.11%、68.10%、76.92%。和 0~20 cm 土层情况相似, 20~40 cm 土层, 复合隔层仍表现出更优的脱盐效果, 同时在节水条件下, JSS 处理脱盐率高于 CK。

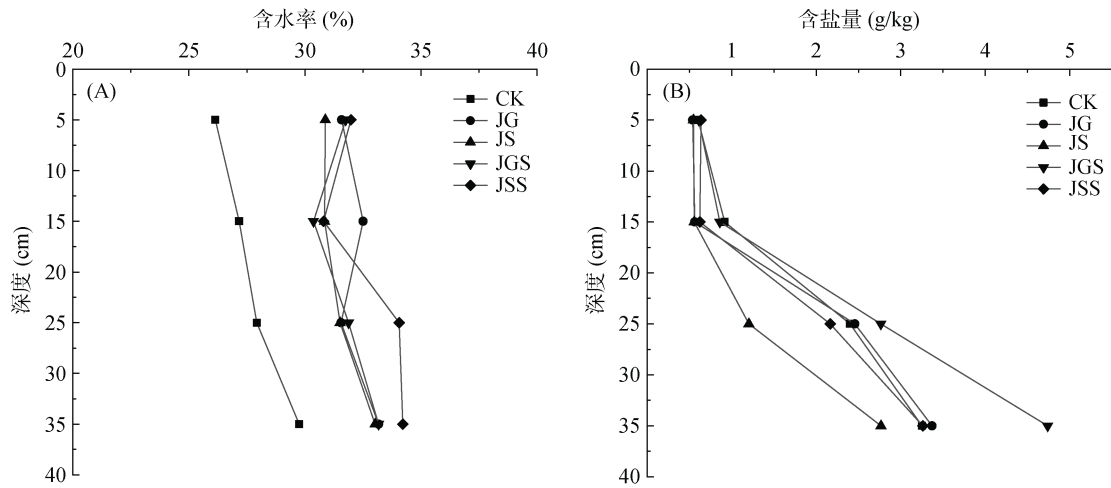


图 2 不同处理下入渗后 0~40 cm 土层水盐分布
 Fig.2 Distribution of soil water and salt contents in 0-40 cm layers under different treatments after infiltration

总体来看，相比秸秆隔层，复合隔层处理更有利于在灌溉过程中保蓄水分、提升淋盐效果，同时在节水 20% 时，保水和淋盐效果仍优于未节水的对照。

2.3 复合隔层及节水条件对蒸发过程中土壤水盐运移的影响

蒸发过程中的土壤水盐分布及变化能够反映不同处理对土壤水盐的动态调控作用。从 25 cm 和 35 cm 深度土壤的含水率随时间的变化情况(图 3)来看，随着蒸发的进行，相比较秸秆隔层，复合隔层能

起到对上层土壤补水的效果。常规灌溉处理中，JS 在蒸发第 50、90 天时，25 cm 深度的含水率分别较 JG 高 41.59%、92.82%(图 3A)，35 cm 深度的含水率分别较 JG 高 44.45%、88.39%(图 3B)。节水处理中，JSS 在蒸发第 50、90 天时，25 cm 深度含水率较 JGS 分别高 9.82%、27.02%，在 35 cm 深度含水率分别高 11.97%、21.43%。这表明加入保水剂的复合隔层能在蒸发过程中提高上层土壤含水率，且这一补水效果在蒸发后期更加明显。

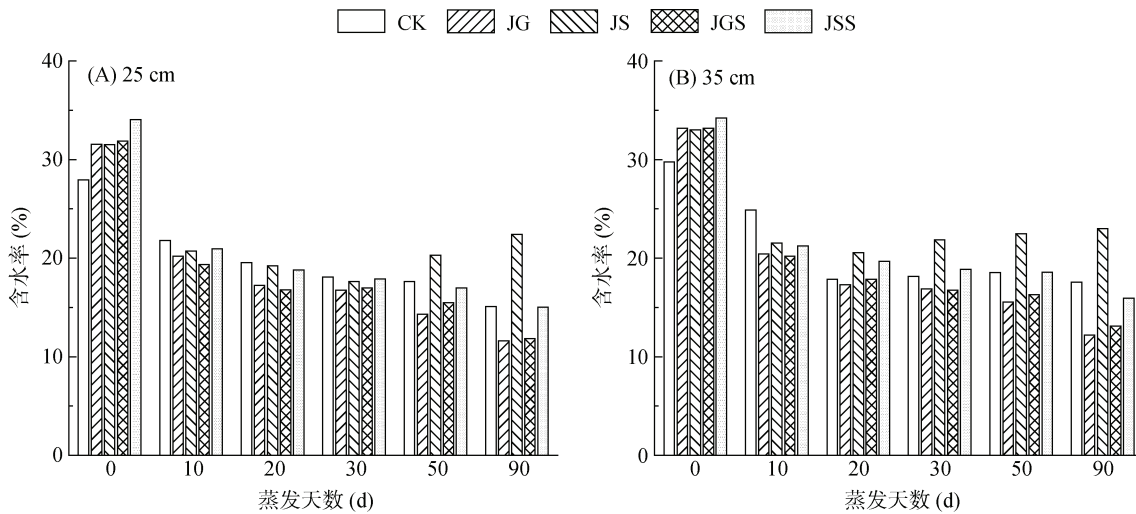


图 3 连续蒸发过程中不同处理 25 cm 和 35 cm 深度土壤含水率
 Fig.3 Soil moistures at 25 cm and 35 cm depths under different treatments during evaporation process

另外，复合隔层在蒸发过程中的抑盐效果也优于秸秆隔层。从蒸发过程中不同时期 0~40 cm 土壤的含盐量(图 4)来看，蒸发 90 d 后，JG、JS、JGS、JSS 在 0~40 cm 土层的平均含盐量分别较 CK 低 29.85%、50.30%、5.84%、15.49%，这表明复合隔层

在蒸发过程中抑制土表返盐的效果优于秸秆隔层。蒸发初期(图 4A)，JGS 处理平均含盐量相对较高，JS 处理最低；蒸发前中期(图 4B)，25 和 35 cm 深度土壤盐分明显上升，JS 处理平均含盐量仍然最低；蒸发中期(图 4C)，CK 处理 35 cm 深度盐分上升

至 4.83 g/kg, 而 JG、JS 处理分别为 2.30、2.04 g/kg, 分别较 CK 低 52.38%、57.76%, 这表明隔层处理能够在蒸发过程中抑制土壤返盐, 且复合隔层的抑盐效果更优; 蒸发后期(图 4D), JS 在整个剖面盐分都较低, 但 JSS 在 5 和 25 cm 深度的盐分较高, 说明复合隔层在常规灌水条件下能有效抑制盐分表聚, 但节水会对其抑盐效果有一定影响。

从蒸发过程不同时间段 35 cm 土层含盐量的变化

来看(图 5), 复合隔层在整个蒸发过程中明显抑制了盐分的积累, 且抑制效果优于秸秆隔层。蒸发初期, 节水组 JSS、JGS 抑制盐分的效果不明显, 但是随着蒸发的进行, 在蒸发后期其盐分均较 CK 低, 说明隔层处理在节水条件下能起到抑盐的作用, 但作用较常规灌溉有所减弱。总体来看, 隔层处理能够有效抑制隔层上层土壤的返盐, 且复合隔层的抑盐效果持续优于秸秆隔层, 节水条件下隔层处理也仍能有效抑制返盐。

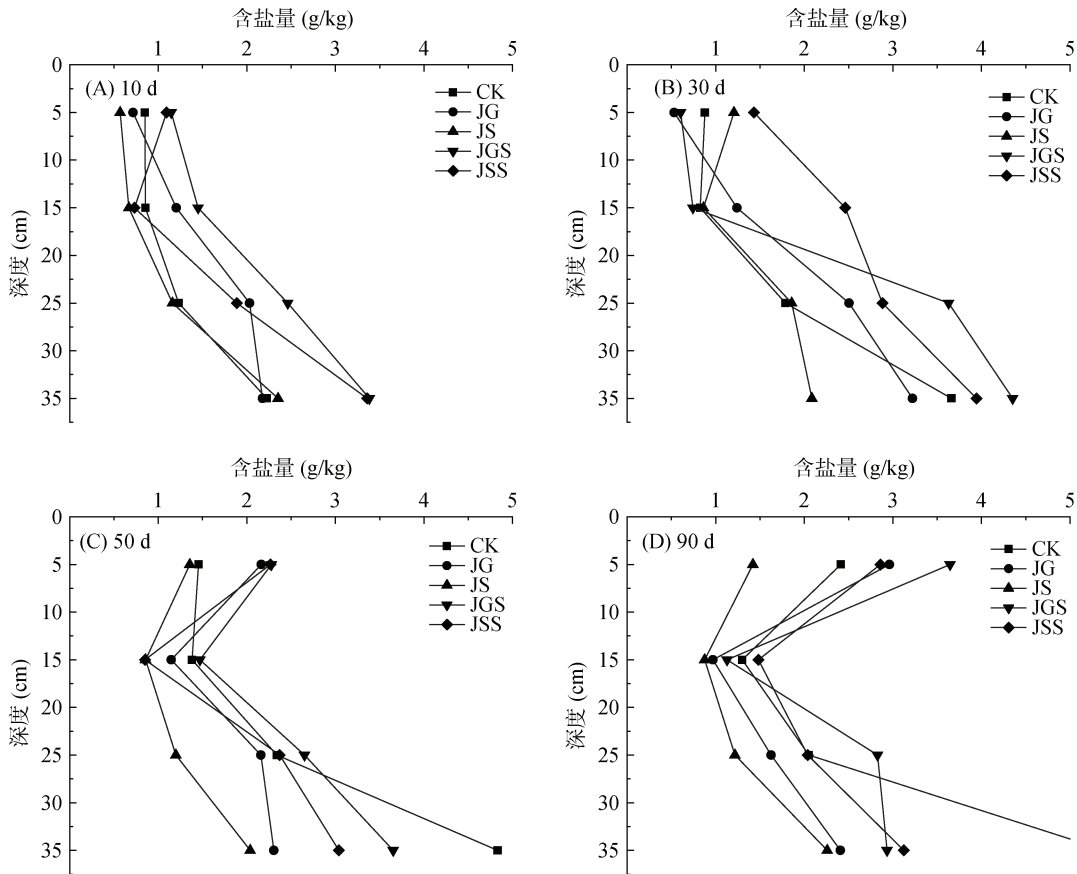


图 4 蒸发过程中不同处理 0~40 cm 土层含盐量变化

Fig.4 Soil salt content changes in 0-40 cm layers under different treatments during evaporation

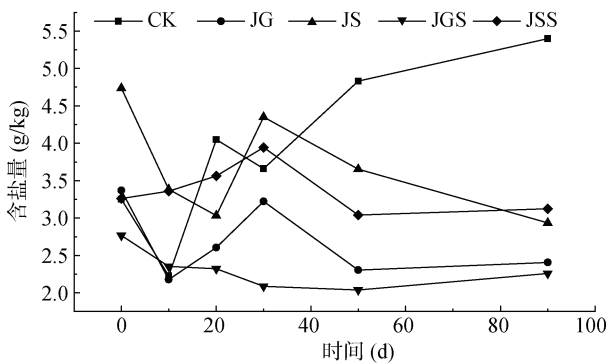


图 5 蒸发过程中不同处理 35 cm 深度土壤含盐量变化

Fig.5 Soil salt content changes at 35 cm depth under different treatments during evaporation

3 讨论

3.1 复合隔层对土壤入渗特性的影响

隔层的存在明显降低了湿润峰的推进速度, 延缓了水分的下渗, 使得水分在隔层上方土层停留时间增加。这是由于隔层与土壤交界面处毛管不连续, 二者间存在水势差, 当湿润峰到达隔层上、下两处与土壤的交界面时, 需待界面两端水势平衡后方可继续下渗, 因而呈现出隔层阻碍水分入渗的效果^[14]。复合隔层内部加入的保水剂颗粒, 能够在水分入渗至隔层时不断吸水, 这导致复合隔层内部水势降低的速度较秸秆隔层慢, 延长了土层和隔层二者水势相等的这一

过程；同时吸水扩大后的保水剂颗粒阻断了部分水流表现为通道，减小了过水面积^[12]，因此相较于秸秆隔层，复合隔层增强了缓渗效果。隔层下部土壤的平均含水率表现为 JG>CK>JS>JGS>JS，这可能与隔层的孔隙较土壤更大，能更多地吸收、容纳水分有关，复合隔层由于保水剂的加入，吸水能力更强，下层土壤的含水率相应也越低。另外，研究结果表明，节水会减缓深层土壤湿润锋运动速度，并降低深层土壤含水量，JG 和 JS 在 55~65 cm 的平均含水率较 JGS、JSS 分别高 22.17%、28.98%，这是因为在不充分供水条件下，湿润峰在下渗至深层土壤中时，静水压力和水势梯度不足^[24-25]。

3.2 复合隔层处理在入渗过程中的水盐分布特性

入渗结束后，隔层处理上层含水率均高于对照，这表明隔层能提高上层土壤入渗后的含水率和储水量，这与郭相平等^[26]的研究结果一致。从入渗的淋盐效果来看，隔层由于具有良好的阻水性，水分在上层土壤中停留时间延长，利于土壤中可溶性盐分离子交换、吸附和解析过程的进行，下渗后会带走更多的盐分，进而提高脱盐率，这与张金珠等^[27]的研究结果一致。复合隔层由于缓渗效果的增强，水分在 0~40 cm 土层中停留时间也相应延长，进而能更充分地溶解、淋洗土壤中的盐分，其淋盐效果优于对照和秸秆隔层。

节水条件下，JGS、JSS 的脱盐率分别较 JG、JS 有所降低，这是由于水量减少导致盐分溶解量变少，脱盐效果变差。然而 JSS 处理虽然减少了 20% 的灌溉水量，但其 0~40 cm 平均盐分含量仍较常规灌溉的 CK 低，平均含水率也较 CK 高 21.33%，这是由于复合隔层能够通过减缓水分入渗增加淋盐水分利用效率，进而起到节水的作用^[17]。

3.3 复合隔层在蒸发过程中对水盐运移的影响

本研究表明，隔层处理 0~40 cm 土层的平均含水率在蒸发过程中始终低于 CK，这是由于隔层与土壤导水率差异较大，水分运动不能进入秸秆隔层，而是在交界面下层土壤中停滞，上部水分因得不到底土层的补给而降低^[11]。在秸秆隔层中加入保水剂后形成的复合隔层，能够显著提升 20~40 cm 土层的含水率。经过 90 d 蒸发后，复合隔层较秸秆隔层在 25、35 cm 土层，含水率分别提高了 90.60%、24.06%，这是由于保水剂在入渗过程中能够吸收大量水分并储存，在上层土壤蒸发缺水时释水，对上层土壤进行水分补给。但补给深度只限于 20~40 cm 土层，对 0~20 cm 土层补给效果有限，这可能是由于强烈的

蒸发破坏了 0~20 cm 土层的毛细作用，切断了 20~40 cm 土壤水分向上继续补给的通道。

随着蒸发过程的进行，上层土壤含水率逐渐减小，水势逐渐增大^[28]，对照处理深层土壤的水分携带着大量盐分通过毛细作用向上补给，进一步蒸发后，盐分逐渐积累，上层土壤含盐量随之增加，在蒸发第 50、90 天时，对照处理 0~40 cm 土层含盐量分别较第 0 天时提升 39.49%、56.12%。但隔层处理切断了大部分土壤毛细管，抑制了地下水的上行补给^[29]，同时也抑制了上层土壤返盐。复合隔层在蒸发过程中抑盐效果优于秸秆隔层，原因可能在于复合隔层中保水剂的存在，在更大程度上切断了毛细管，隔水能力增加，更有效地隔阻了深层土壤盐分随毛细作用上升，抑制土表返盐。

4 结论

1)入渗过程中，两种隔层均能延缓水分入渗，提高淋盐效果。而相比秸秆隔层，复合隔层处理缓渗淋盐效果更优。复合隔层灌溉水分入渗时间较秸秆隔层延缓 14.47%，0~40 cm 土层脱盐率提升 34.86%。

2)蒸发过程中，复合隔层能够通过内部保水剂缓慢释水，对 20~40 cm 土层补水，该土层含水率较秸秆隔层提升 10.90%~90.61%。

3)节水 20% 的条件下，复合隔层处理在 0~40 cm 土层的灌溉淋盐效果及蒸发过程中的保水抑盐效果优于未进行节水处理的对照组。综合来看，秸秆-保水剂形成的复合隔层其淋盐效果、保水抑盐效果均优于秸秆隔层，可实现在灌溉过程中节水 20% 的目的。从节水、土壤脱盐、提高上层土壤含水率以及环保等方面综合考虑，在土壤中埋设秸秆-保水剂复合隔层是河套灌区节水型盐碱障碍治理中可供选择的一种技术方案。

参考文献：

- [1] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区节水灌溉与水肥高效利用研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 1-12.
- [2] 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.
- [3] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 防止土壤盐渍化, 提高土壤生产力[J]. 科学, 2021, 73(6): 30-34, 2, 4.
- [4] Huang Y, Zhang Z, Li Z H, et al. Evaluation of water use efficiency and optimal irrigation quantity of spring maize in Hetao Irrigation District using the Noah-MP Land Surface Model[J]. Agricultural Water Management, 2022, 264: 107498.

- [5] 王鹏, 王瑞萍. 河套灌区农业节水灌溉发展历程及展望[J]. 内蒙古水利, 2022(8): 67-69.
- [6] Fu G B, Chen S L, Liu C M, et al. Hydro-climatic trends of the Yellow River Basin for the last 50 years[J]. Climatic Change, 2004, 65(1): 149-178.
- [7] Shi H L, Hu C H, Wang Y G, et al. Analyses of trends and causes for variations in runoff and sediment load of the Yellow River[J]. International Journal of Sediment Research, 2017, 32(2): 171-179.
- [8] Zhu W, Yang J S, Yao R J, et al. Buried layers change soil water flow and solute transport from the Yellow River Delta, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(4): 1598-1608.
- [9] 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.
- [10] Zhao Y G, Li Y Y, Wang J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 363-370.
- [11] Zhao Y G, Pang H C, Wang J, et al. Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield[J]. Field Crops Research, 2014, 161: 16-25.
- [12] 王立成, 朱珠, 孔芊芊, 等. 棉秆与风积沙混掺隔层对土壤水分入渗及水盐迁移特性的影响[J]. 中国农村水利水电, 2023(8): 209-216.
- [13] Zhang H Y, Pang H C, Zhao Y G, 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.
- [14] 王国丽, 常芳弟, 张宏媛, 等. 不同厚度秸秆隔层对河套灌区盐碱土壤温度、水分和食葵产量的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(19): 4155-4168.
- [15] 张宏媛, 逢焕成, 卢闯, 等. CT 扫描分析秸秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 114-122.
- [16] 常芳弟, 王国丽, 张晓丽, 等. 河套灌区春灌结合秸秆隔层对盐碱土壤温度的调控效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 1987-1997.
- [17] 卢闯, 逢焕成, 张宏媛, 等. 春灌结合秸秆隔层促进土壤脱盐增加微生物多样性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 87-94.
- [18] 张万锋, 杨树青, 靳亚红, 等. 秸秆深埋下灌水量对土壤水盐分布与夏玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 228-237.
- [19] 高昊辰, 焦爱萍, 陈诚, 等. 高分子化学地膜对盐渍土壤物理性质与水分蒸发效应[J]. 土壤, 2021, 53(5): 1057-1063.
- [20] 陈利军, 林涛, 娄振帅, 等. 不同灌溉定额下地膜残留量对土壤物理性质及棉花根系生长的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(9): 2121-2128.
- [21] 解雪峰, 濮励杰, 沈洪运, 等. 滨海重度盐碱地改良土壤盐渍化动态特征及预测[J]. 土壤学报, 2022, 59(6): 1504-1516.
- [22] 宿翠翠, 周彦芳, 施志国, 等. 不同施肥方式与保水剂互作对河西地区黄芪土壤微环境及产量的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 94-103.
- [23] 马友华, 孟召鹏, 赵彬, 等. 保水剂在节水抗旱农业中的应用[J]. 安徽农学通报, 2002, 8(4): 5-7.
- [24] 谭军利, 马永鑫, 王西娜, 等. 微咸水灌溉下滴头流量及灌水量对压砂土壤入渗及水盐分布的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 113-120.
- [25] 郑飞龙, 王西娜, 葛敏, 等. 压砂条件下灰钙土地区农田土壤水分垂直入渗特征研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 314-321.
- [26] 郭相平, 杨泊, 王振昌, 等. 秸秆隔层对滨海盐渍土水盐运移影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(5): 22-27.
- [27] 张金珠, 王振华, 虎胆·吐马尔白. 具有秸秆夹层层状土壤一维垂直入渗水盐分布特征[J]. 土壤, 2014, 46(5): 954-960.
- [28] 姚宝林, 孙三民, 李发永, 等. 潜水蒸发条件下不同棉秆隔层埋深对土壤盐分时空分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 95-102.
- [29] 池宝亮, 庞金梅, 焦晓燕. 秸秆不同覆盖方式在控制根层盐化中的作用[J]. 山西农业大学学报, 1994, 14(4): 440-443.