

盐碱棉田地表-地下接力式滴灌下水盐分布及棉花生长特征

张 滢,何子建,石浩磊,祁 辰,曹红霞,李志军

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院,旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:地表-地下接力滴灌是集膜下滴灌和地下滴灌优点于一体的新型节水控盐技术,但目前针对该技术应用效果的研究尚少。针对如何对地表-地下接力式滴灌中的地表滴灌和地下滴灌进行水量分配效果最优这一问题,设置100%地表滴灌(W1)、75%地表滴灌+25%地下滴灌(W2)、50%地表滴灌+50%地下滴灌(W3)、25%地表滴灌+75%地下滴灌(W4)、100%地下滴灌(W5)共计5个处理,比较了不同水量分配下的地表-地下接力式滴灌与单一地表滴灌、单一地下滴灌对盐碱棉田土壤水盐分布和棉花产量的影响。结果表明:(1)W3处理根区土壤含水量分布最均匀,干燥区域面积最小。(2)W4处理窄行区域淋洗范围最大,脱盐效果最显著。(3)W3处理棉花吐絮期总干物质量和籽棉产量最大,分别为112.66 g和9 147 kg·hm⁻²;吐絮期总干物质量比W1和W5处理分别提高11.3%和19.1%,籽棉产量比W1和W5处理分别提高14.1%和11.9%。地表-地下接力式滴灌处理下土壤含水量得以显著改善,在对土壤盐分进行淋洗的过程中表现出接力效应,淋洗面积和淋洗效果均有所增大。相比于单一地表滴灌和单一地下滴灌,地表-地下接力式滴灌下棉花干物质量显著增加,产量明显提高。研究表明,地表滴灌和地下滴灌之间存在良好的协同作用,采用50%地表滴灌+50%地下滴灌模式有助于调控盐碱棉田水盐分布,提高棉花产量和水分利用效率,可为发展盐碱地新型节水灌溉技术提供理论支撑。

关键词:棉花;滴灌;水量分配;水盐分布

中图分类号:S562; S275 **文献标志码:**A

Salt distribution and cotton growth characteristics of saline-alkali cotton field under surface-subsurface relay drip irrigation

ZHANG Yi, HE Zijian, SHI Haolei, QI Chen, CAO Hongxia, LI Zhijun

(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Surface-subsurface relay drip irrigation is a new water-saving and salt-controlling technology which combines the advantages of surface drip irrigation and subsurface drip irrigation, but there are still few researches on it. In response to the issue of how to optimize the water allocation effect of surface drip irrigation and subsurface drip irrigation in surface-subsurface relay drip irrigation, five treatments were set up: 100% surface drip irrigation (W1), 75% surface drip irrigation+25% subsurface drip irrigation (W2), 50% surface drip irrigation+50% subsurface drip irrigation (W3), 25% surface drip irrigation+75% subsurface drip irrigation (W4), and 100% subsurface drip irrigation (W5). The effects of surface-subsurface relay drip irrigation with single surface drip irrigation and single subsurface drip irrigation under different water allocation on soil water and salt distribution and cotton yield in saline alkali cotton fields were compared. The results showed that: (1) W3 treatment had the most uniform distribution of soil moisture content in the root zone, while the dry area was the smallest. (2) The narrow row area of W4 treatment had the largest washing range and the most significant desalination effect. (3) The total dry matter mass and seed cotton yield during the boll opening period of cotton under the W3 treatment reached the highest lev-

收稿日期:2023-02-09

修回日期:2023-05-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52179047);国家重点研发计划项目(2022YFD1900401)

作者简介:张滢(1998-),男,湖南湘潭人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:1026540823@qq.com

通信作者:曹红霞(1971-),女,新疆五家渠人,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:nschx225@nwfau.edu.cn

el, with 112.66 g and 9 147 kg · hm⁻², respectively. The total dry matter mass during the boll opening period increased by 11.3% and 19.1% compared with W1 and W5 treatments, respectively, and the seed cotton yield increased by 14.1% and 11.9% compared with W1 and W5 treatments, respectively. Under the surface-subsurface relay drip irrigation treatment, the soil moisture content was significantly improved, and a relay effect was observed during the leaching of soil salt. The leaching area and effectiveness were both increased. Compared with single surface drip irrigation and single subsurface drip irrigation, the dry matter quality of cotton under surface-subsurface relay drip irrigation significantly increased, and the yield significantly improved. The research showed that there was a good synergy between surface drip irrigation and subsurface drip irrigation. The 50% surface drip irrigation + 50% subsurface drip irrigation was a better mode to regulate the water and salt distribution in saline alkali cotton fields, improve cotton yield and water use efficiency and provide theoretical support for the development of new water-saving irrigation technology in alkali soil.

Keywords: cotton; drip irrigation; water allocation; water and salt distribution

新疆是我国最大的棉花种植基地,地处欧亚大陆腹地,气候干旱,降雨稀少,95%以上的作物耗水量主要依靠灌溉,农业用水量已达到全疆总用水量90%以上^[1-2]。新疆还是我国最大的盐碱土分布区,盐碱土占新疆灌区总耕地面积的37.72%,土壤盐渍化严重影响棉花出苗率、品质和产量^[3-7]。土壤盐碱化和水资源短缺是制约新疆农业发展的主要障碍,也是影响新疆农业生态系统和生态环境稳定的重要因素^[8-10]。发展新型节水灌溉技术,制定高效节水灌溉策略,对土壤水盐进行合理调控,是新疆棉花产业可持续发展的关键。

地表滴灌是目前科技含量较高的节水灌溉技术,其将滴灌技术和地膜覆盖技术集成一体,利用管道输水和节水,利用薄膜实现保水,在新疆地区得到大规模推广和应用^[11-12],但随着地表滴灌技术长期使用,其缺陷也逐步暴露出来。张伟等^[13]发现长期地表滴灌可导致土壤湿润锋处盐分不断积累而造成土壤次生盐碱化。王振华等^[14]指出要达到较好淋洗效果,地表滴灌实际灌水定额要高于其理论值。地下滴灌是高效节水技术的又一次创新,其通过将灌水毛管及其灌水器埋入土壤,借助毛细管或重力作用将水分扩散到作物根系层,实现精准灌溉^[15]。因其能减少因土壤蒸发、深层渗漏和地表径流造成的水分流失,被广泛应用于干旱半干旱地区高价值果蔬作物灌溉^[16-17]。但地下滴灌下表层土壤一般较干燥,不利于种子发芽和苗期生长,土壤表层和浅层返盐现象严重^[18]。一些学者将地表滴灌和地下滴灌进行有机结合,并在玉米大田试验中取得了一定的增产效应^[19],但目前关于地表-地下滴灌系统的研究仍然较少。

地表滴灌系统和地下滴灌系统之间究竟有无联合效应,如何在地表-地下滴灌系统中使上下水

量分配达到最优效果,这些问题都有待进一步研究。因此,本文将地表-地下接力滴灌与单一地表滴灌、单一地下滴灌进行对比,并对地表-地下接力式滴灌进行不同水量分配,探求地表-地下接力式滴灌系统对新疆盐碱棉田土壤水盐分布和棉花产量的影响,从而确定盐碱棉田最适水量分配模式,为盐碱地区发展节水农业和保障水土环境可持续发展提供新思路。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于新疆石河子市146团北泉镇新疆天业集团高标准农田示范区(85°58'13"E, 44°28'49"N)。区域内气候干旱,降水稀少,蒸发强烈,年平均气温6~8℃。无霜期168~171 d。年降水量125.0~207.7 mm,年蒸发量达到1 500 mm。土壤为盐碱性砂壤土,土壤容重为1.51 g · cm⁻³,田间体积持水量为32%。区域内主要以灌溉农业为主,主要经济作物为棉花。

1.2 试验方法与设计

试验作物为棉花,按照当地“一膜三管六行”的模式进行种植,小区布置如图1所示。棉花于2021年4月18日播种,9月20日收获。为了保障出苗顺利,在棉花播种后第5 d采用地表滴灌灌溉出苗水,灌水定额700 m³ · hm⁻²。六月初开始到棉花吐絮期截止,每7 d根据 ET_c 进行一次灌水,在苗期、现蕾期、开花期进行生育期洗盐,每次洗盐水量为1 200 m³ · hm⁻²,总灌溉水量为3 600 m³ · hm⁻² + 80% ET_c ^[20-23]。 ET_c 根据 $ET_c = ET_0 \times K_c$ 获得, ET_0 由试验区气象站数据计算获得, K_c 为作物系数。灌溉水源均为当地渠水,每次灌水先进行地表滴灌灌水,地表滴灌终止灌水后进行地下滴灌灌水,具体

灌溉制度如表 1 所示。化肥均随水施加,除第一次灌水外,其余 11 次灌水均等量施肥,总施肥量按当地施肥标准 ($N-P_2O_5-K_2O:300-120-60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。试验中除虫、除草、打顶等农艺操作均同当地管理模式。

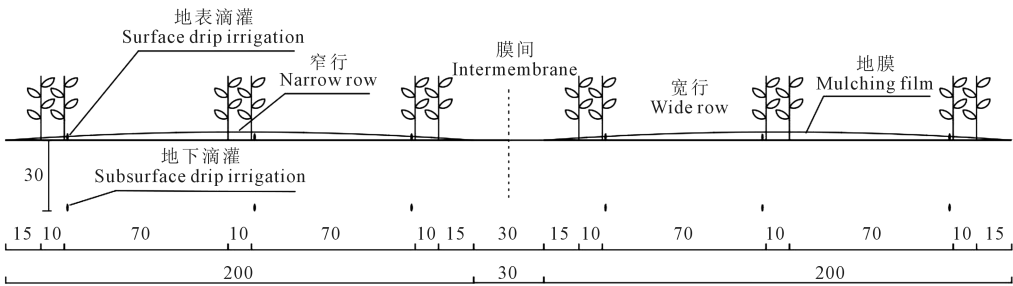


图 1 小区布置示意图/cm
Fig.1 Layout of the drip irrigation system

表 1 灌溉制度

Table 1 Irrigation scheduling

日期(月-日) Date (m-d)	灌溉量 Irrigation volume/mm
04-25	70
06-11	176
06-18	28
06-25	30
07-02	152
07-09	21
07-16	35
07-23	31
07-30	148
08-06	29
08-13	32
08-20	17

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤含水量和含盐量 生育期第一次灌水前和最后一次灌水后分别在膜间、窄行、宽行中间用土钻取土,0~40 cm 土层每隔 10 cm 取土,40~100 cm 土层每隔 20 cm 取土。采用烘干法(105℃,8 h 以上)测定土壤质量含水率。测定土壤含水量后,将烘干土样研磨后过 1 mm 筛,称取 5 g 并加入 25 ml 蒸馏水后震荡、过滤,用电导率仪(DDS-307 型,中国)测定电导率值,再利用电导率仪中已有的电导率和盐分含量关系标线,计算得出土壤含盐量。土壤含盐量与电导率的关系可用式(1)表示:

$$SC = 0.0061 \times EC \quad (R^2 = 0.9682) \quad (1)$$

式中,SC 为土壤含盐量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$);EC 为土水比 1:5 时所测电导率值 ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)。

试验共设 5 个处理,分别为 100% 地表滴灌 (W1)、75%地表滴灌+25%地下滴灌 (W2)、50%地表滴灌+50%地下滴灌 (W3)、25%地表滴灌+75%地下滴灌 (W4)、100%地下滴灌 (W5),各处理 3 次重复。

1.3.2 棉花干物质量 棉花吐絮期在各个小区取 4 株具有代表性的棉花植株,将各器官分离后用信封分装后放入 108℃烘箱中杀青 0.5 h,随后将烘箱温度调至 75℃烘至恒重,称量其干物质重量,并计算单株植株干物质总量。

1.3.3 棉花产量 采用样田法,于吐絮期在各小区随机选取长×宽为 2.3 m×1 m 的区域进行测产,统计每个区域内的棉花总铃数,随机选取不同高度的棉絮共 100 朵,计算单铃重,最后估算棉花籽棉产量,并重复 3 次取均值代表该处理籽棉产量。

2 结果与分析

2.1 地表-地下滴灌不同水量分配下土壤水分变化

各处理初始土壤水分分布状况如图 2 所示。各处理初始土壤水分分布情况基本一致。出苗水灌溉 45 d 后,在垂直方向上,土壤含水量随土层深度的增加而增加,土壤表层含水量显著低于土壤深层。在水平方向上,窄行区域土壤含水量最低,显著低于宽行和膜间区域。整体上来看,等含水率线近似呈“U”形分布。

棉花生育末期各处理土壤水分状况如图 3 所示。棉花生育期末各处理间土壤水分分布有着明显差异。W1 处理下,深层土壤含水量较大,越靠近土壤表层含水量越小,0~30 cm 深处土壤含水量显著降低,土壤含水率等值线近似水平分布。王振华等^[24]研究发现,地下滴灌处理棉花根冠长度之比以及干物质量之比均高于膜下滴灌处理。W2、W3、W4、W5 处理下,窄行土壤干旱层相较于 W1 处理下明显下移,且在窄行 50~80 cm 深处土壤含水量显

著降低,分析认为地下滴灌方式可使棉花根系生长到更深区域,从而增强棉花对较深层土壤水分的吸收和利用。W3 处理下,不同深度土壤含水量最为均匀,膜间区域 0~80 cm 深度土壤含水率等值线近似垂直分布。W2、W3、W4 处理下,膜间土壤含水量显著增大,这是因为垂直方向上地表、地下部分同时供水,使得土壤含水量分布更为均匀,且土壤湿润体纵向分布更深,使得棉花根系纵向分布更深,

削弱了棉花根系横向生长,从而减少棉花对水平方向较远处的水分吸收。盛统民等^[25]在研究不同灌溉方式对棉花根系的影响时,在 0~70 cm 深度区域发现了类似的棉花根系向水性。W5 处理下,土壤 50~80 cm 深处以及窄行土壤 0~30 cm 处土壤含水量明显降低,由于地下滴灌处理下,棉花根系分布更深,对土壤深层水分吸收更强,故而相对于其他处理,深层土壤含水量更低。

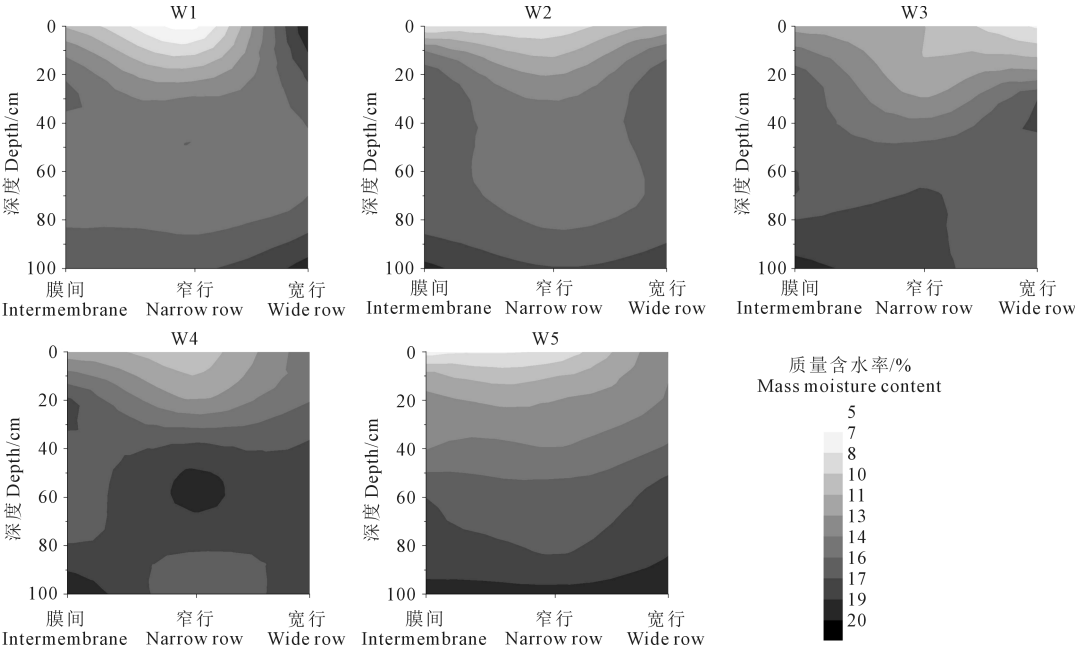


图 2 生育期初期 0~100 cm 深度土层含水率

Fig.2 Moisture content of 0~100 cm soil layer at the beginning of growth period

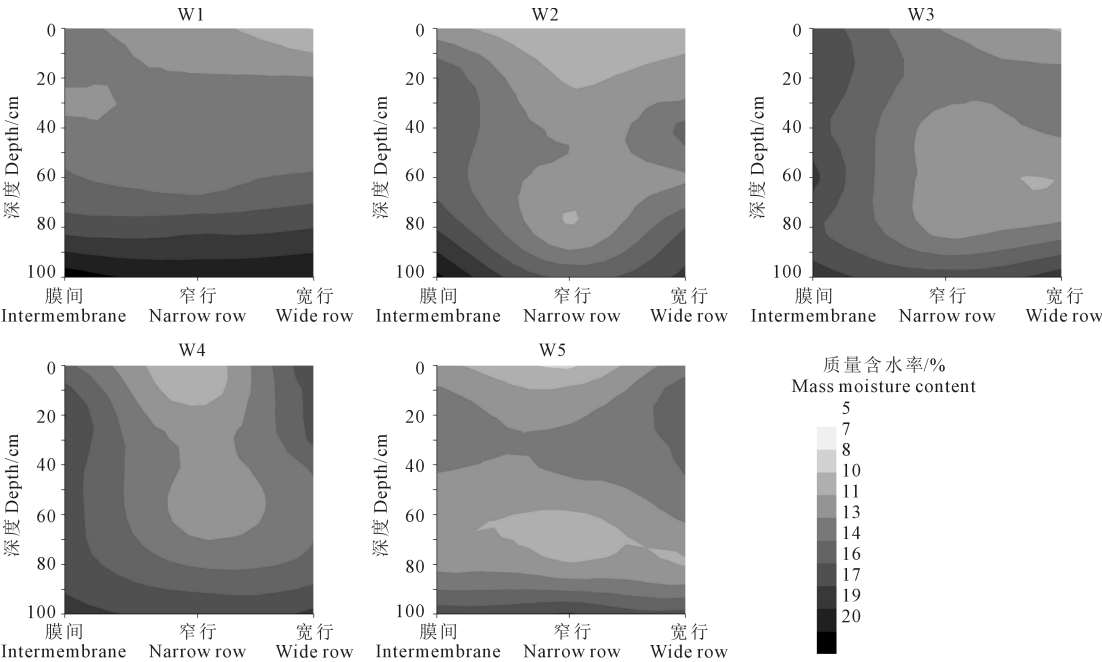


图 3 生育期末期 0~100 cm 深度土层含水率

Fig.3 Moisture content of 0~100 cm soil layer at the end of growth period

2.2 地表-地下滴灌不同水量分配下土壤盐分变化

图 4 为棉花出苗后各处理土壤盐分分布情况。各处理前期 0~60 cm 土层土壤盐分分布特征大体一致。受蒸发影响,土壤盐分在膜间区域地表聚集。0~60 cm 土层中,膜间区域含盐量最大,宽行次之,窄行含盐量最低。各处理窄行 0~20 cm 处出现

一个明显的盐分淡化区,说明地表滴灌灌溉出苗水对棉花窄行浅层土壤盐分有明显的淋洗效果。虽然棉花出苗后,对窄行区域土壤水分有较强的吸收作用,但并没有出现盐分聚集现象。

如图 5 所示,生育期末期各处理土壤盐分主要聚集在膜间区域,尤其以膜间区域地表处积盐最为

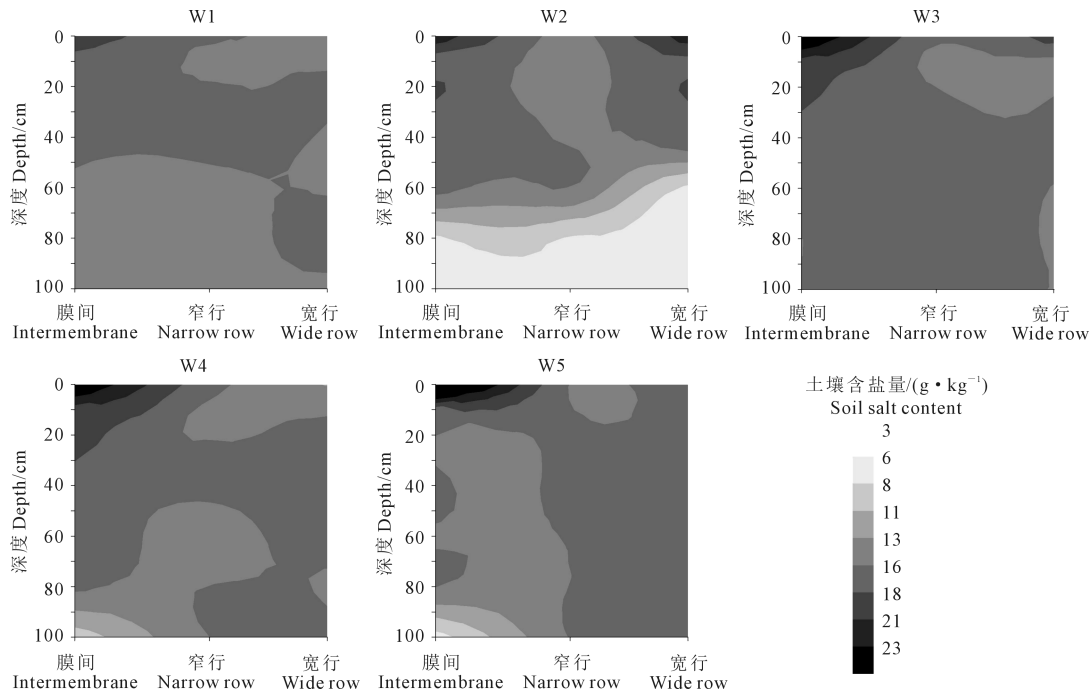


图 4 生育期初期 0~100 cm 深度土层含盐量

Fig.4 Salt content of 0~100 cm soil layer at the beginning of growth stage

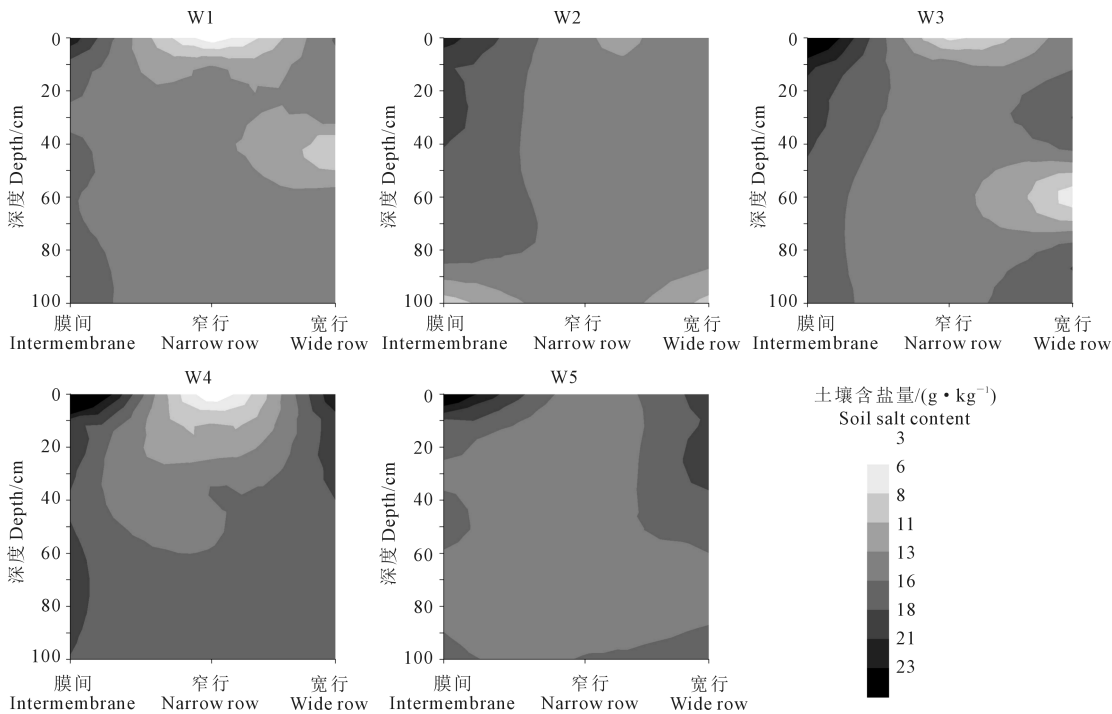


图 5 生育期末期 0~100 cm 深度土层含盐量

Fig.5 Salt content of 0~100 cm soil layer at the end of growth period

严重。各处理下,宽行区域盐分均有所累积,但较之膜间区域盐分积累显著减少。W1 处理下,宽行区域脱盐区主要集中在 35~55 cm 土层;W2 处理下,宽行区域盐分分布均匀,但脱盐效果不明显;W3 处理下,宽行区域 50~70 cm 土层脱盐效果明显,10~40 cm 区域和 75 cm 土层以下区域出现明显积盐现象;W4 处理下,宽行区域 0~40 cm 土层大量积盐;W5 处理下,宽行区域 60~90 cm 土层土壤出现盐分淡化现象。各处理下,窄行区域含盐量最低,出现明显脱盐区域。W1 处理下,窄行区域脱盐区主要集中在 0~20 cm 土层;W2 处理下脱盐区域较少,仅在窄行地表附近出现小块脱盐区域,窄行除地表以外区域盐分分布均匀,不同深度土壤含盐量无显著差异;W3 处理下,窄行区域 0~10 cm 土层脱盐效果明显;W4 处理下脱盐面积最大,窄行 0~20 cm 土层脱盐效果显著,20~60 cm 土层出现明显淡盐区;W5 处理下窄行全部区域均存在盐分淡化现象,但盐分淡化程度不大,脱盐效果不理想。

2.3 地表-地下滴灌不同水量分配对棉花干物质量的影响

表 2 反映了不同水量分配下棉花吐絮期干物质量情况。吐絮期棉花主根干物质量在 W3 处理下达到最大(5.74 g)、在 W5 处理下最小(4.83 g),W3 比 W5 高出 18.84%,但处理间差异并不显著。吐絮期棉花平均茎、叶干物质积累随地下滴灌分配灌水量增加呈先增加后减少的趋势。棉花吐絮期铃干物质量在 W2 处理下最大(65.25 g)、W5 处理下最小

(56.63 g),W2 比 W5 高出 15.2%。W2、W3、W4 处理下,棉花吐絮期铃干物质量均显著高于 W1 和 W5 处理,说明同时采用地表滴灌和地下滴灌处理能显著提高棉花总生物量。而单一地表滴灌和单一地下滴灌处理之间,棉花吐絮期干物质量没有显著差异。此外,随地下滴灌分配灌水量的增加,各处理吐絮期铃干物质量均呈现出先增加后减少的趋势。棉花吐絮期总干物质量在 W3 处理下最大(112.66 g),比 W1、W5 处理分别提高 11.3%、19.1%。

2.4 地表-地下滴灌不同水量分配对棉花生产指标的影响

如表 3 所示,不同垂直水量分配下棉花单铃重、单株铃数、籽棉产量存在显著差异。随地下滴灌分配灌水量增加,棉花单铃重呈现出先增加后减少的趋势,W2 和 W3 处理下单铃重较大,W1、W4、W5 处理下单铃重较小。W1 处理下棉花单株铃数较小,W2、W3、W4、W5 处理之间棉花单株铃数无显著差异。随地下滴灌分配灌水量增加,籽棉产量呈现出先增加后减少的趋势,W3 处理下籽棉产量最大(9 147 kg·hm⁻²)、W1 处理下最小(8 018 kg·hm⁻²)。各处理下籽棉产量和单铃重存在相似的变化趋势,说明影响各处理籽棉产量的主要指标是棉花单铃重,而单株铃数对籽棉产量的影响较小。单一地表滴灌和单一地下滴灌处理下籽棉产量无明显差异,地表滴灌和地下滴灌协同灌溉时籽棉产量增加,且当地表滴灌和地下滴灌灌水量相等时籽棉产量最大。

表 2 不同处理下棉花吐絮期干物质量

Table 2 Dry matter quality of cotton at batting stage under different treatments							
处理 Treatment	根 Root/g	茎 Stem/g	叶 Leaf/g	花 Flower/g	蕾 Bud/g	铃 Boll/g	总量 Overall/g
W1	5.41a	22.57ab	15.67ab			60.03bc	101.23b
W2	5.29a	23.17ab	16.56ab			65.25a	110.27a
W3	5.74a	25.10a	17.69a	0.77	1.63	61.57ab	112.66a
W4	5.27a	26.09a	17.62a	0.21		61.54ab	110.56a
W5	4.83a	19.10b	13.00b			56.63c	94.62b

注:图中不同小写字母表示该项指标在不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different lowercase letters in the figure indicate that the index has significant difference among different treatments (P<0.05). The same below.

表 3 不同处理下棉花产量

Table 3 Cotton yield under different treatments			
处理 Treatment	单铃重 Single boll weight/g	单株铃数/个 Boll number per plant	籽棉产量 Seed cotton yield/(kg·hm ⁻²)
W1	5.45b	7.05b	8018c
W2	5.61a	7.68ab	8992ab
W3	5.67a	7.73ab	9147a
W4	5.39b	7.63ab	8605b
W5	5.39b	7.27ab	8177c

3 讨 论

以往研究主要集中于对单一地表滴灌或者单一地下滴灌方式,很少有学者研究地表滴灌和地下滴灌的协同效应。本研究通过对比不同地表-地下水量分配下北疆盐碱棉田的土壤水分、盐分变化及其对棉花生长的影响,发现地表-地下滴灌接力式滴灌处理下土壤水盐分布、棉花生长生产等情况与

单一地表或单一地下滴灌处理下差异显著。单一地表滴灌下生育期末期土壤含水量等值线近似水平,膜间区域较为干燥,窄行和宽行区域含水量近似,20~60 cm 处水分分布较为均匀,可能是受棉花根系吸水作用影响,膜下 0~20 cm 土层区域出现小块干燥区,这与弋鹏飞^[26]研究结果类似。李东伟等^[27]也证实地表滴灌下棉花根系耗水主要集中在 0~30 cm 土层。本研究中,单一地下滴灌下生育末期土壤含水率存在两个明显的低点,随土壤深度增加,棉花根区土壤含水量先增大后减小,这与王振华等^[28]研究结果类似,分析认为可能是 0~20 cm 浅根层区域缺少灌水而 40~80 cm 深层根区发育旺盛造成的。W2 处理下,地表滴灌分配水量较多,地下滴灌分配水量较少,由于地表灌水量减少,膜下 0~20 cm 浅层根区干燥区域明显变大,可能是地下滴灌的少量灌溉在一定程度上刺激了棉花根系的深层生长^[25],因而加强了对 60~80 cm 土层土壤水分的吸收,故而 W2 处理虽然分配了一定灌溉水量进行地下滴灌,其 60~80 cm 深度土壤含水量反而低于单一地表滴灌。W3 处理下,地表滴灌和地下滴灌分配相同灌溉水量,W3 处理地表灌水量相对于 W1 和 W2 较少,但 W3 处理浅层土壤水分高于 W1 和 W2,这可能是因为灌水量减少抑制了棉花浅层根系生长。W3 处理下较深层土壤同样出现干燥区域,且干燥面积大于 W2 处理,说明增加地下滴灌水量后,棉花深层根系生长更加旺盛。W4 处理进一步增加了地下滴灌灌水量,深层根区土壤虽然出现干燥现象,但干燥程度小于 W3 处理,而减少了地表灌水量,使得 W4 浅层土壤干旱程度大于 W3 处理。总体而言,地表-地下接力式滴灌显著改变了土壤湿润体分形状和分布,使土壤垂向水分分布更加均匀。

由于盐随水动,土壤水分分布发生改变的同时,土壤盐分分布也随之变化,因此各处理下棉花根区土壤盐分分布情况均不相同^[29-30]。本研究中,单一地下滴灌处理下,盐分淋洗范围较大,整个窄行区域以及膜间和宽行下部区域都土壤盐分有所淡化,但淡化程度不彻底,脱盐效果不理想,在裸地表层、宽行区域 0~30 cm 以及各区域深层土壤中盐分大量积累。王振华^[31]研究表明,地下滴灌下棉田土壤盐分运移方式为水平方向上在各滴灌带中间位置积聚,垂直方向上主要在地表和深层积聚,但主要运移到较深的土壤。本研究中,单一地表滴灌处理下脱盐区域主要集中在窄行 0~20 cm 和宽行 35~55 cm 土层区域,这可能是水分运移导致的。水

分从布置在窄行的滴头中流出,将盐分向下冲洗,故而在地表附近形成一块明显的脱盐区,而水分在向下淋洗的过程中,也会存在一定侧渗,因此对宽行和膜间区域也有一定淋洗,但膜间区域蒸发强烈导致返盐现象严重,这与弋鹏飞^[26]研究结果类似。胡清阳^[32]研究发现,淋洗定额相同时,地下滴灌比地表滴灌对中深层土壤有更好的淋洗效果,但地下滴灌表层 0~20 cm 土壤含盐量要大于地表滴灌;当灌水方式相同时,淋洗定额越大,淋洗效果越好。Li 等^[33]研究发现,不同土壤湿润模式对根系空间结构和行间距内吸水能力具有显著影响。本研究中,W2 处理由于地表滴灌分配水量减少,故而上层淋洗作用减弱,仅在窄行表层形成小块脱盐区。地下滴灌对 W2 处理较深层土壤有一定的淋洗效果,但由于水量过少加上根系吸水影响,淋洗效果并不突出。W3 处理下虽然地表灌水量进一步减少,但可能棉花地表根系发育受到抑制,根系吸水作用降低,使得淋洗效果增加,浅层脱盐区较 W2 处理稍大,但不及 W1 处理;W3 处理下地下滴灌分配灌水量增加,较深层土壤淋洗效果显著增强,宽行 50~70 cm 土层出现脱盐区,窄行区域土壤含盐量也有所降低;W4 处理下根区土壤脱盐量最大,窄行 0~60 cm 土层区域淋洗效果显著。这可能是由于棉花浅层根系进一步受到抑制,使得地表滴灌淋洗效果加强,将盐分淋洗到 30 cm 土层以下,然后地下滴灌进行进一步淋洗,形成接力效应,使得窄行浅层和中层土壤得到充分淋洗。结果表明,地表-地下接力式滴灌处理下,窄行区域土壤垂直盐分分布较为均匀,土壤脱盐区的位置和大小发生改变,适当的进行上下水量分配能有效地扩大根区土壤脱盐面积。

随着土壤水分和盐分含量发生改变,棉花生长性状发生变化,进而导致棉花产量出现差异^[34-35]。在相同灌水量情况下,W1 和 W5 处理干物质质量及产量指标上基本表现一致。地表-地下接力式滴灌处理下棉花生育期略微延迟,W2 处理下棉花平均铃干物质质量、单絮重等指标表现最优,W2、W3、W4 处理总干物质质量都显著高于 W1 和 W5 处理,W3 处理在棉花平均主根干物质质量、籽棉产量上取得最大值。李东伟等^[36]研究发现,宽浅型土壤湿润区膜下棉花根系分布和植株生长更均匀、产量及水分利用效率更高,这可能是 W4 处理下窄行区域土壤盐分淋洗最为纵深,但籽棉产量不如 W3 处理的原因。研究表明,地表滴灌和地下滴灌之间存在良好的协同作用,地表-地下滴灌系统在改善土壤水盐分布、促进棉花生产等方面要优于单一地表或单一地下

滴灌模式。

4 结 论

1) 地表-地下接力式滴灌能显著改善棉花根区土壤水分分布,使根区土壤保有较好的水分条件;

2) 地表-地下交替滴灌表现出接力效应,相较于单一地表滴灌和单一地下滴灌,有更好的淋洗效果;

3) 地表-地下接力式滴灌下棉花干物质积累量显著增加,产量显著提高,W3 处理下籽棉产量比单一地表滴灌提高了 14.1%,比单一地下滴灌提高了 11.9%。

参 考 文 献:

- [1] 毕磊. 新疆农田土壤水盐氮运移与棉花生长特征研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- BI L. A study on the movement characteristics of soil moisture and salt content and nitrogen content and cotton growth in Xinjiang farmland [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [2] 雷成霞, 申孝军, 郭银. 地下滴灌条件下水分胁迫对棉花生理性状及水分利用率的影响[J]. 节水灌溉, 2020, (4): 57-61.
- LEI C X, SHEN X J, GUO Y. Effects of water stress on physiological characteristics and water use efficiency of cotton under subsurface drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2020, (4): 57-61.
- [3] 李文昊, 王振华, 郑旭荣, 等. 新疆绿洲盐碱滴灌区域荒地土壤盐分变化[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(8): 722-729.
- LI W H, WANG Z H, ZHENG X R, et al. Variation of soil salinity in wasteland of oasis saline drip irrigation area in Xinjiang[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34 (8): 722-729.
- [4] 田长彦, 买文选, 赵振勇. 新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7064-7068.
- TIAN C Y, MAI W X, ZHAO Z Y. Study on key technologies of ecological management of saline alkali land in arid area of Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7064-7068.
- [5] 乔学瑾, 石建初, 谭丽丽, 等. 新疆安集海灌区膜下滴灌棉田根系层土壤盐分多尺度空间分布特征[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1202-1213.
- QIAO X J, SHI J C, TAN L L, et al. Multi-scale spatial distribution characteristics of soil salinity in root-zone in film-mulched drip-irrigated cotton fields in Anjihai Irrigation Zone, Xinjiang[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1202-1213.
- [6] CHEN W L, JIN M G, FERRÉ T P A, et al. Soil conditions affect cotton root distribution and cotton yield under mulched drip irrigation [J]. Field Crops Research, 2020, 249: 107743.
- [7] XIAO C, LI M, FAN J L, et al. Salt leaching with brackish water during growing season improves cotton growth and productivity, water use efficiency and soil sustainability in southern Xinjiang [J]. Water, 2021, 13(18): 2602.
- [8] HE Z J, CAO H X, HU Q Y, et al. Optimization of apple irrigation and N fertilizer in Loess Plateau of China based on ANP-EWM-

- TOPSIS comprehensive evaluation [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 311: 111794.
- [9] HOU X H, FAN J L, HU W H, et al. Optimal irrigation amount and nitrogen rate improved seed cotton yield while maintaining fiber quality of drip-fertigated cotton in northwest China [J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170: 113710.
- [10] NING S R, ZHOU B B, SHI J C, et al. Soil water/salt balance and water productivity of typical irrigation schedules for cotton under film mulched drip irrigation in northern Xinjiang [J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106651.
- [11] 焦会青. 绿洲棉田膜下滴灌土壤水盐运移模型构建及应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- JIAO H Q. Soil water and salt dynamics under mulched drip irrigation in an oasis cotton field: model development and application [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [12] 马英杰, 何继武, 洪明, 等. 新疆膜下滴灌技术发展过程及趋势分析[J]. 节水灌溉, 2010, (12): 87-89.
- MA Y J, HE J W, HONG M, et al. Analysis of development process and tendency of drip irrigation under film technology in Xinjiang [J]. Water Saving Irrigation, 2010, (12): 87-89.
- [13] 张伟, 吕新, 李鲁华, 等. 新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 15-19.
- ZHANG W, LYU X, LI L H, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 15-19.
- [14] 王振华, 杨培岭, 郑旭荣, 等. 膜下滴灌系统不同应用年限棉田根区盐分变化及适耕性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 90-99.
- WANG Z H, YANG P L, ZHENG X R, et al. Soil salinity changes of root zone and arable in cotton field with drip irrigation under mulch for different years [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(4): 90-99.
- [15] 寇丹, 苏德荣, 吴迪, 等. 地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 116-123.
- KOU D, SU D R, WU D, et al. Effects of regulated deficit irrigation on water consumption, hay yield and quality of alfalfa under subsurface drip irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(2): 116-123.
- [16] DIRWAI T L, MABHAUDHI T, KANDA E K, et al. Moistube irrigation technology development, adoption and future prospects: a systematic scoping review [J]. Heliyon, 2021, 7(2): e06213.
- [17] APPELS W M, KARIMI R. Analysis of soil wetting patterns in subsurface drip irrigation systems-indoor alfalfa experiments [J]. Agricultural Water Management, 2021, 250: 106832.
- [18] 李道西, 罗金耀. 地下滴灌技术的研究及其进展[J]. 中国农村水利水电, 2003, (7): 15-18.
- LI D X, LUO J Y. Summary on research and development of subsurface drip irrigation techniques [J]. China Rural Water and Hydropower, 2003, (7): 15-18.
- [19] CAO Y X, CAI H J, SUN S K, et al. Effects of drip irrigation methods on yield and water productivity of maize in Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 259: 107227.
- [20] 胡清阳, 曹红霞, 何子建, 等. 淋洗定额与覆盖方式对北疆棉花

生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 27-33.

HU Q Y, CAO H X, HE Z J, et al. Combined effect of drip irrigation amount and straw mulch on growth and yield of cotton in salinized soils in northern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(5): 27-33.

[21] 张瀚, 杨鹏年, 汪昌树, 等. 干旱区不同冬灌定额对土壤水盐分布的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(11): 42-46.

ZHANG H, YANG P N, WANG C S, et al. Effect of winter irrigation amount on soil moisture and salt distribution in arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(11): 42-46.

[22] 赵波, 王振华, 李文昊. 滴灌方式及定额对北疆冬灌棉田土壤水盐分布及次年棉花生长的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 139-148.

ZHAO B, WANG Z H, LI W H. Effects of winter drip irrigation mode and quota on water and salt distribution in cotton field soil and cotton growth next year in northern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(6): 139-148.

[23] 张迎春, 张富仓, 范军亮, 等. 滴灌技术参数对南疆棉花生长和土壤水盐的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 107-117.

ZHANG Y C, ZHANG F C, FAN J L, et al. Effects of drip irrigation technical parameters on cotton growth, soil moisture and salinity in southern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 107-117.

[24] 王振华, 郑旭荣, 刘洪光, 等. 非充分灌溉对地下滴灌棉花根系生长分布影响的初步研究[J]. 节水灌溉, 2008,(4): 20-22.

WANG Z H, ZHENG X R, LIU H G, et al. Preliminary study on influence of insufficient irrigation on cotton root system distribution under subsurface drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2008,(4): 20-22.

[25] 盛统民, 张胜江, 苟欢欢. 不同灌溉方式对棉花根系分布的影响研究[J]. 节水灌溉, 2020,(9): 100-105.

SHENG T M, ZHANG S J, GOU H H. Effect of different irrigation methods on cotton root distribution [J]. Water Saving Irrigation, 2020,(9): 100-105.

[26] 弋鹏飞. 膜下滴灌棉田土壤水盐运移规律试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2011.

YI P F. Study on water-salt transport law under drip irrigation with film mulch of cotton [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2011.

[27] 李东伟, 李明思, 刘东, 等. 膜下滴灌土壤湿润范围对棉花根层土壤水热环境和根系耗水的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2437-2444.

LI D W, LI M S, LIU D, et al. Effects of soil wetting pattern on the soil water-thermal environment and cotton root water consumption under mulched drip irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2437-2444.

[28] 王振华, 吕德生, 温新明. 地下滴灌条件下土壤水盐运移特点的实验研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2005, 23(1): 85-87.

WANG Z H, LYU D S, WEN X M. Experimental research on characteristic of soil water and salt transport under subsurface drip irrigation [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2005, 23(1): 85-87.

[29] 何子建, 史文娟, 杨军强. 膜下滴灌间作盐生植物棉田水盐运移特征及脱盐效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 129-138.

HE Z J, SHI W J, YANG J Q. Water and salt transport and desalination effect of halophytes intercropped cotton field with drip irrigation under film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 129-138.

[30] 王全九, 王文焰, 吕殿青, 等. 膜下滴灌盐碱地水盐运移特征研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 54-57.

WANG Q J, WANG W Y, LYU D Q, et al. Water and salt transport features for salt-affected soil through drip irrigation under film[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4): 54-57.

[31] 王振华. 新疆棉花地下滴灌水盐运移规律的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2005.

WANG Z H. Research on regulation of soil water-salt transport under subsurface drip irrigation in cotton field in Xinjiang [D]. Shihezi: Shihezi University, 2005.

[32] 胡清阳. 滴灌方式和生育期洗盐定额对盐碱棉田土壤水盐运移及棉花生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.

HU Q Y. Effects of different drip irrigation methods on soil water-salt transport and crop growth in salinized cotton field [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.

[33] LI D W, LI M S, SHEN X J, et al. Response of spatial structure of cotton root to soil-wetting patterns under mulched drip irrigation[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(5): 153-162.

[34] YANG G, LI F D, TIAN L J, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water mulched drip irrigation [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104592.

[35] CHEN W L, CHEN F F, LAI S X, et al. Spatial distribution and dynamics of cotton fine root under film-mulched drip irrigation[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 179: 114693.

[36] 李东伟, 李明思, 周新国, 等. 土壤带状湿润均匀性对膜下滴灌棉花生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 130-137.

LI D W, LI M S, ZHOU X G, et al. Influence of soil banding moisture uniformity on growth and water use efficiency of drip irrigated cotton under mulch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(9): 130-137.