

南疆重盐碱地夹层土壤水分入渗特征

刘洪波^{1,2}, 栗现文³, 白云岗^{1,2}, 卢震林^{1,2}, 张博³

(1.新疆水利水电科学研究院,新疆乌鲁木齐 830049; 2.农业农村部盐碱土改良与利用(干旱半干旱区盐碱地)重点实验室,新疆乌鲁木齐 830052; 3.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100)

摘要:为探明重盐碱地夹层土壤在不同情景下的水分入渗特征,对水分入渗曲线、湿润锋、累积入渗量等指标进行监测。结果表明:在夹层排序相同、灌水量不同时,随着灌水量增大,水分入渗率增大,湿润锋运移距离增加但均未入渗到最底层。在相同灌水量下,夹层厚度增加或夹层位置上移对夹层上下层的土壤含水率、湿润锋运移推进时间和累积入渗量的影响更大。打孔灌沙可提高水分入渗率,减少湿润锋运移时间,改善了各土层的剖面含水率,其湿润锋运移深度可达到100 cm外,其他处理中最大仅87.8 cm,Kostiakov模型能较好地模拟重盐碱地不同剖面构型夹层土壤水分的入渗特性。综上,在重盐碱土壤含夹层的条件下,灌水量过低或夹层上移与加厚均不利于水分入渗,建议在南疆重盐碱地夹层土壤位置在60~80 cm、厚度为10~15 cm的区域,适宜灌水量应在 $3\ 150\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上,结合打孔灌沙措施则能显著改善重盐碱地夹层土壤的水分入渗特性。

关键词:重盐碱地;夹层土壤;水分入渗;打孔灌沙;南疆地区

中图分类号:S152.7 文献标志码:A

Infiltration characteristics of soil moisture in the stratified soil of heavily saline-alkaline land in Southern Xinjiang

LIU Hongbo^{1,2}, LI Xianwen³, BAI Yungang^{1,2}, LU Zhenlin^{1,2}, ZHANG Bo³

(1. Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi, Xinjiang 830049, China; 2. Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Improvement and Utilization (Saline-Alkali Land in Arid and Semi-Arid Regions), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The water infiltration curve, wetting front, and cumulative infiltration were monitored to determine the water infiltration characteristics of the interlayer soil under different scenarios. The results showed that, with the increase of irrigation amount, the water infiltration rate and the migration distance of wet front increased but did not penetrate to the lowest layer. Under the same irrigation volume, the increase of interlayer thickness compared with the increase of interlayer position, the change of soil moisture content above and below interlayer was greater, and the advance time of wetting front migration and cumulative infiltration were slightly higher. Drilling sand irrigation improved the water infiltration rate, reduced the time of wet front migration, and improved the profile water content of each soil layer. The depth of wet front migration could reach 100 cm, while the maximum was only 87.8 cm in other treatments. Kostiakov model could well simulate the water infiltration characteristics of interlayer soil with different profile configurations in heavy saline-alkali land. To sum up, under the condition that the heavy saline-alkali soil contains interlayer, too low irrigation water or interlayer moving up and thickening are not conducive to water infiltration. It is suggested that for areas with interlayer soil 60~80 cm deep and 10~15 cm thick in the heavy saline-alkali soil of southern Xinjiang, appropriate irrigation should exceed $3\ 150\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, combined with drilling and sand irrigation treatment. This approach can significantly improve the water infiltration characteristics of the in-

收稿日期:2024-07-31

修回日期:2024-09-13

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A02007-3);新疆维吾尔自治区天山英才科技创新领军人才培养项目(2022TSYCLJ0069)

作者简介:刘洪波(1982-),男,湖北天门人,高级工程师,主要从事农业高效节水与土壤盐渍化改良技术研究。E-mail:lh090@163.com

通信作者:栗现文(1985-),男,河北邯郸人,副教授,主要从事灌区土壤水盐运移监测与模拟研究。E-mail:lixianwen@nwfau.edu.cn

terlayer soil in heavy saline-alkali conditions.

Keywords: heavily saline-alkaline land; interlayer soil; water infiltration; drilling and sand filling; southern Xinjiang region

我国盐碱地总面积约为 $9.9 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 已被开垦种植的面积不到其总面积的 20%, 约 80% 的盐碱地有发展成为耕地的潜力^[1]。新疆现有的 $1.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 的宜农荒地, 其中受盐碱限制的面积达 $5.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占总面积的 50.0%^[2], 其中板结化耕地面积 $3.3 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 约占新疆耕地面积的 8.0%, 而南疆盐渍化耕地占全疆耕地总面积的 49.6%, 在中度以上盐渍化区域, 土壤板结夹层的现象十分普遍, 严重制约了南疆灌溉农业的可持续发展, 探究重盐碱夹层土壤的水分入渗特征, 对制定科学合理的灌溉制度与适宜的土壤改良技术具有重要的理论与现实意义。

我国西北地区的土壤剖面多呈层状结构, 常见的层状剖面有上粘下砂、上砂下粘和砂夹粘或粘夹砂与特殊夹层型。层状土壤的持水能力和入渗特性与均质土存在很大差异, 在层状结构条件下, 土壤质地的不均匀性使土水势在界面处发生突变, 导致入渗水分在界面处的运动方式也相应发生变化^[3-4]。如 Si 等^[5] 研究发现, 由于层状土壤分层界面处孔隙的不连续性, 整个土体内的水分分布与水流通量受到影响。早期关于层状土壤入渗规律的研究中, Colman 等^[6] 提出可以将每层土壤看作均质土, 且无论是细质土覆盖粗质土, 或是粗质土覆盖细质土, 其入渗过程均由细质土控制。Miller 等^[7] 发现无论两层土的粗细顺序如何, 只要当下层土壤的质地与导水特性和表层土壤不同时, 入渗率均出现降低。对于不同的土壤质地排序, 阻水的机理也不相同。如当粗质土覆盖细质土时, 上层的粗质土流速高于下层细质土的水力传导率, 便形成水力障碍, 而当细质土覆盖粗质土时, 交界面处的基质势

低于粗质土, 则使水不能进入下层, 就会形成毛细屏障^[8], 即细砂与粗砂交替形式分布的层状土壤能够提高土壤持水量^[9], 同时, 夹层结构不仅能改变土壤水分入渗性能, 也影响了水的分布状况^[10], 且不同的灌水量^[11]、夹层土壤质地^[12]、灌水方式^[13] 等均会对水分入渗产生影响。

当前, 在夹层土壤水分入渗规律的研究上取得了相对丰富的研究成果, 但是关于新疆南疆地区重盐碱地夹层土壤水分运动的研究还未有报道。因此, 本文针对南疆地区在高标准农田建设和规模化节水改造后, 基于重盐碱地普遍存在夹层土壤的现实情况, 为揭示重盐碱地夹层土壤对水分入渗特性的影响机理, 拟通过垂直一维入渗试验, 探明不同灌水量和夹层位置与夹层厚度对土壤入渗特性的影响, 阐明不同情景下夹层土壤的水分入渗特性, 为南疆地区重盐碱地的合理开发与改良利用提供基础理论和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在新疆阿克苏地区沙雅县渭干河灌区海楼镇海楼村高效节水试验示范基地进行, 土壤于 2021 年 12 月采自于沙雅利华现代农业有限公司海楼 1 区农田 ($41^\circ 14' 53'' \text{N}$, $82^\circ 43' 33'' \text{E}$)。土壤按照大田原状土层分装采集后运回实验室, 先后在晾晒板上风干、碾压、磨碎和过 2 mm 筛, 再按土层分别混合均匀后备用。采用 EyeTech 激光粒度分析仪测定试验土壤机械组成, 各层土壤均为粉砂质壤土, 用环刀法田间实测得到容重, 采用时域反射仪并结合烘干法通过校准对比获得初始含水率。土壤具体物理参数如表 1 所示。

表 1 试验土壤基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of tested soil

土壤深度 Soil depth/cm	颗粒组成体积分数 Particle composition/%			质地 Texture	容重 Bulk density /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	初始含水率 Initial moisture content /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水量 Field capacity /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
	<0.002 mm	0.002~0.05 mm	>0.05 mm				
0~10	5.87	85.72	8.41	粉砂质壤土 Silty loam	1.65	0.056	0.352
10~20	5.51	86.51	7.98	粉砂质壤土 Silty loam	1.56	0.065	0.337
20~30	6.16	88.08	5.76	粉砂质壤土 Silty loam	1.51	0.073	0.330
30~40	5.88	87.39	6.73	粉砂质壤土 Silty loam	1.61	0.071	0.400
40~50	4.32	88.64	7.04	粉砂质壤土 Silty loam	1.38	0.063	0.329
50~60	5.77	91.02	3.21	粉砂质壤土 Silty loam	1.56	0.071	0.312
60~70	6.75	90.14	3.11	粉砂质壤土 Silty loam	1.73	0.069	0.284
70~80	4.68	86.13	9.19	粉砂质壤土 Silty loam	1.69	0.067	0.398
80~90	4.29	84.21	11.50	粉砂质壤土 Silty loam	1.55	0.063	0.410
90~100	5.41	89.82	4.77	粉砂质壤土 Silty loam	1.57	0.064	0.381

1.2 土层构型设计

在 2020 年 11 月,于沙雅利华现代农业有限公司海楼 1 区重盐碱农田挖取 5 个剖面,夹层土壤位置均在 60~80 cm 深度、厚度为 10~15 cm,为能充分体现出大田夹层土壤空间差异性,并结合大田冬灌的实际定额,共设 6 个处理。其中不同灌溉定额处理 3 个,灌溉定额分别为 $3\ 150\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (T1)、 $2\ 700\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (T2) 和 $2\ 250\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (T3),夹层厚度 10 cm,位置均在 60~70 cm 处。打孔灌沙处理 (T4) 1 个,灌溉定额 $3\ 150\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、夹层厚度 10 cm,夹层位置在 60~70 cm 处,在中心插入带孔塑料管,开孔直径 3 mm,孔间距 1 cm,管的内径 2 cm、外径 2.6 cm,插入深度 80 cm,管内填满石英砂(2 mm 粒径);夹层位置试验处理 1 个 (T5),灌溉定额 $3\ 150\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,夹层厚度 10 cm,位置在 50~60 cm 处;夹层厚度试验处理 (T6) 1 个,灌溉定额 $3\ 150\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、夹层厚度 15 cm,位置在 60~75 cm 处。试验中 T1~T4 处理均按表 1 中各土层容重装填;T5 处理在 50~60 cm 处装填夹层土壤,容重为 $1.73\ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,60~70 cm 处装填原 50~60 cm 土层,其它分层土壤不变;T6 处理在 60~75 cm 深度装填夹层土壤,75~100 cm 按原分层装填。

1.3 试验装置与过程

试验装置如图 1 所示。有机玻璃管内径为 20 cm、高度 140 cm,土柱最底部装填 5 cm 石英砂,以上 0~100 cm 严格按原状土分层装填,按每层 5 cm 称取相应质量进行分层填装,为了避免在试验过程中土柱产生分层现象,需要先将土层表面抓毛,再填下一层。各处理均在 10、30、50、70、90 cm 插入 DJS-10C 土壤三参传感器探头,连接土壤参数采集系统 (BSI-DS16T),土柱填装完成后,土壤表面覆盖上滤纸,静置 48 h。入渗试验开始后,按照时间先密后疏,记录湿润锋的位置并读取累积入渗量,同时设定数据采集器步长为以每 5 min 自动记录入渗过程中传感器探头处土壤含水率、盐分和温度随时间的变化,水全部渗完、湿润锋无明显变化,视为入渗试验结束。

1.4 入渗模型与评价指标

Kostiakov 模型是一种常见的经验模型,其计算方便,且能较好地反映出土壤的入渗特征,本文采用最小二乘法对不同处理的试验数据进行拟合,分析模型模拟夹层土壤剖面 (T1~T6) 土壤水分入渗过程的适用性。

Kostiakov 入渗模型为:

$$I(t) = kt^n \quad (k > 0, 0 < a < 1)$$

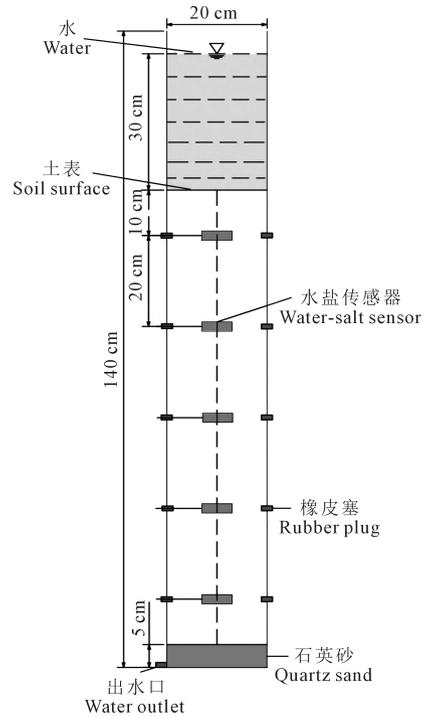


图 1 土柱结构与传感器位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of soil column structure and sensor position

式中, $I(t)$ 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); k 和 n 为模型经验参数。

利用决定系数 (R^2) 及相对均方根误差 ($RRMSE$) 作为评价 Kostiakov 模型模拟土壤水分入渗效果的指标参数,其中 R^2 的值越接近于 1, $RRMSE$ 值越小,表明所选用的入渗模型的拟合效果越好。

1.5 数据分析

采用 WPS 2022 进行数据处理与分析,利用 Origin 2021 软件进行图表绘制,应用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析与回归分析。

2 结果与分析

2.1 夹层对入渗率的影响

入渗率的大小受到土壤初始含水率、质地、土壤构造和供水等多种因素综合作用的影响。试验先在各土层物理特性不变的条件下,研究不同灌水量对入渗率的影响,然后确定出较理想的灌水量,之后在灌水量不变的条件下,研究打孔灌沙、夹层位置、夹层厚度的变化对入渗率的影响。为了能够更好地说明夹层对土壤入渗率的影响,分别用土壤的整体稳定入渗率、夹层上方土层平均入渗率、夹层平均入渗率进行计算分析。

各处理土柱整体的入渗率如图 2 所示,可以看出,各处理入渗率变化均随着时间的推移呈先快速

减小而后趋于稳定的趋势。主要原因是在入渗初期,土壤表层的初始含水率很低,具有很高的土壤水吸力,相应的入渗率很大。随着时间的延长,土壤水吸力随含水率不断增加而减小,入渗率也逐渐趋于稳定。各处理在稳定入渗率上表现出一定差异,总体上看,T1、T2、T3、T4处理大致在1 500 min后趋于稳定,T5和T6处理在5 000 min后趋于稳定。

用入渗稳定后的累积入渗量与入渗时间的比值作为稳定入渗率,然后再进行单位转换与分析,结果如表2所示。T1、T2和T3处理的灌水量不同,但稳定入渗率表现出随着灌水量减小而降低的变化规律,但相差较小,T1、T2、T3处理的稳定入渗率分别为0.226、0.226、0.213 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。T4处理的稳定入渗率最大,为3.509 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$,这是由于在土柱中间打孔灌沙后,灌溉水能快速到达土壤底层,提高了入渗率,与T1相比提高了15.53倍。T6处理的夹层厚度由10 cm增加到15 cm后,稳定入渗率降低,较T1降低55.64%。T5处理的夹层位置由60~70 cm处上移到50~60 cm处后,稳定入渗率进一步降低,显著低于其它处理,为0.066 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$,仅为

T1处理的29.20%。说明打孔灌沙能显著提高入渗效果,而夹层厚度增加和夹层位置上移则能显著提高减渗效果。

在湿润锋穿透夹层上方土层的平均入渗率上,各处理的平均入渗率与稳定入渗率的变化规律类似,其中T1处理与T2和T3处理相比,由于灌水量最大,在重力作用下,水分下渗加快,因此,T1处理比T2和T3处理平均入渗率分别提高39.45%和57.63%。T4处理由于灌溉水相比其它处理可更快入渗到更深土层,然后再开始向四周入渗,在平均入渗率的表现上仅低于T1处理,平均入渗率为2.250 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。T5处理的夹层上方土层平均入渗率仅高于T6处理,为1.380 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$,而T6处理最低,为1.164 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$,这是因为T5处理的夹层上移后,由于上方土层由60 cm变为50 cm,但由于整体稳定入渗率最低,导致上方土层的平均入渗率较低,同理,T6处理与其它处理相比,受整体稳定入渗率和上方土层厚度(60 cm)的影响而入渗率最低。当湿润锋到达夹层后,由于受到导水障碍,入渗率将进一步降低,不同处理夹层的平均入渗率表现为T1>T2>T3>T4>T5>T6,其中T1处理的夹层土壤入渗率最大,为0.570 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$,这是由于在灌水量较大条件下,受重力作用下渗加快,相比之下,灌水量降低,水的重力作用也相应降低,因此,T2和T3的夹层土壤入渗率相比T1呈下降趋势。T4处理采用打孔灌沙后相比夹层上移(T5)和夹层加厚(T6)改善了夹层平均入渗率,分别提高63.79%和77.59%,表明夹层上移和加厚增加了夹层的减渗效果。

在本研究中,不同灌水量和夹层位置与夹层厚度的减渗效果不同,随着夹层加厚,减渗效果呈增加趋势,当夹层厚度为15 cm时,减渗效果最强,其次是夹层位置上移至距表土50 cm。以上表明通过打孔灌沙处理后,显著提高了土层整体入渗率,改善了夹层的减渗效果,促进了水分入渗。

2.2 夹层对湿润锋运移的影响

不同处理湿润锋运移距离随时间的变化关系如图3所示。在不同灌水量条件下,对比T1、T2和T3可以看出,受灌水量影响,各处理湿润锋运移距离差异较大,湿润锋运移距离随灌水量增加而增大。其中,T1处理湿润锋推进距离最大,为87.8 cm,T2和T3处理的灌水量相比T1分别减少14.29%和28.57%,湿润锋推进距离分别减少17.31%和21.18%,受灌水量的影响,T2和T3处理湿润锋最大推进距离分别为72.6 cm和69.2 cm,说明T3处理的灌水量不足以穿透夹层。在灌水量相同情况下,

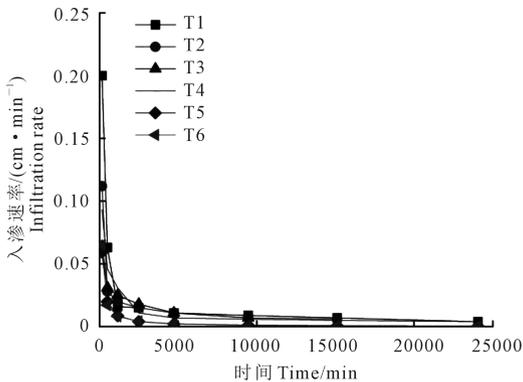


图2 各处理入渗率随时间的变化

Fig.2 Change of infiltration rate with time of each treatment

表2 各处理的入渗特性统计

Table 2 Statistics of infiltration characteristic of each treatment

处理 Treatment	夹层距土 表距离 Distance of clay interlayer from soil surface/cm	稳定 入渗率 Stable infiltration rate /($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)	夹层上方 土层平均 入渗率 Mean infiltration rate of sediment layer above clay interlayer /($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)	夹层平均 入渗率 Mean infiltration rate of clay interlayer /($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
T1	60	0.226	3.696	0.570
T2	60	0.226	2.238	0.426
T3	60	0.213	1.566	0.420
T4	60	3.509	2.250	0.348
T5	50	0.066	1.380	0.126
T6	60	0.100	1.164	0.078

对比 T1、T4、T5 和 T6 处理发现, T4 处理由于通过打孔灌沙穿透了夹层, 加速了水分入渗, 湿润锋推进速率显著高于其它处理, 不仅明显提高了从入渗开始到入渗结束的总用时, 仅为 495 min, 而且湿润锋推进距离超过 100 cm, 并产生了渗漏。T5 和 T6 处理由于夹层上移 10 cm 和加厚 5 cm, 湿润锋运移规律一致, 但 T5 处理推进距离为 81.7 cm, 低于 T6 处理 (88.0 cm), 且两处理在湿润锋推进时间上明显慢于 T1 处理, 最大推进距离总用时分别为 20 050 min 和 13 260 min, 分别是 T1 处理的 3.5 倍和 2.3 倍。

总体上看, 各处理在湿润锋运移深度上表现出大致相同的变化规律, T4 处理由于在中心点位置用打孔穿透了夹层, 其湿润锋运移速率明显高于其它处理。由于夹层的减渗作用, 灌水量对湿润锋的影响显著, 如灌水量太小则不能湿润整个夹层 (T3), 而且采用当地大田常规计划灌水量的处理 (T2), 其湿润锋深度也仅为 72.6 cm, 仅仅穿过夹层。说明在大田存在夹层的条件下, 要使土壤湿润到夹层以下土层, 灌水量需要在 $2\ 700\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上。同时, 由于夹层的位置和厚度不同, 湿润锋穿过夹层上层土壤进入夹层及穿过夹层的时间亦不相同, 其中 T5 和 T6 处理在夹层上方的平均入渗速率和夹层平均入渗速率低于其它处理, 因此, 湿润锋推进历时明显高于其它处理, 说明在灌水量不变的前提下, 夹层位置上移和加厚可显著降低土壤水分入渗, 即夹层上移或加厚使减渗效果增强。而 T4 处理则在一定程度上加速了水分入渗, 不仅提高了各土层整体稳定速率, 也对夹层平均入渗速率和夹层上方入渗速率起到加速作用, 但如果灌水量过大, 由于灌水后该处理水分下渗过快, 会形成深层渗漏, 进而造成水资源的浪费。

2.3 夹层对累积入渗量的影响

累积入渗量是指从入渗开始后, 一定时间段内通过地表单位面积入渗到土壤中的总水量, 各处理累积入渗量随时间变化如图 4 所示。在入渗初期, 水势梯度大, 累积入渗量增加较快, 如 T4 处理, 当水分到达最底层土壤后, 水分在下渗的同时开始向四周入渗, 累积入渗量在入渗 200 min 后呈减缓趋势, 但其入渗速率仍高于其它处理, 累积用时仅为 495 min。其它处理累积入渗量随时间的变化规律一致, 均呈非线性变化, 即累积入渗量在到达夹层界面时, 斜率较大, 累积入渗量随时间变化呈线性关系, 在穿过夹层时, 斜率变小, 当入渗锋面穿过夹层与下层的分界面以后, 累积入渗量的曲线斜率将

再一次增大, 但其增大的程度较到达夹层前的斜率有所减弱。因为入渗试验是在固定水量完全渗入土柱表面时结束, 所以 T1、T4、T5 和 T6 处理的累积入渗量均为 31.5 cm, T2 和 T3 分别为 27.0 cm 和 22.5 cm。但受灌水量和夹层位置等因素影响, 各处理在入渗时间上表现出显著差异, 其中 T1 处理入渗用时 5 730 min, T2 和 T3 处理入渗用时分别为 4 885 min 和 4 100 min, 说明在各土层结构不变的情况下, 入渗用时随着灌水量减小而减少。但当夹层上移和加厚后, 入渗用时显著增加, 如 T5 处理为 20 050 min, T6 处理为 13 260 min。说明在灌水量一定的条件下, 夹层上移或加厚显著增强了减渗效果, 极大延长了入渗时间, 从而在一定程度上限制了水分入渗。而打穿夹层并灌沙后, 由于重构后土壤剖面孔隙的分布状况、过水断面的大小以及土壤水分运动通道等都会改变原来的水分运移规律, 同时由于砂中大孔隙的存在而加速了水分入渗, 并极大地缩短水分入渗用时。

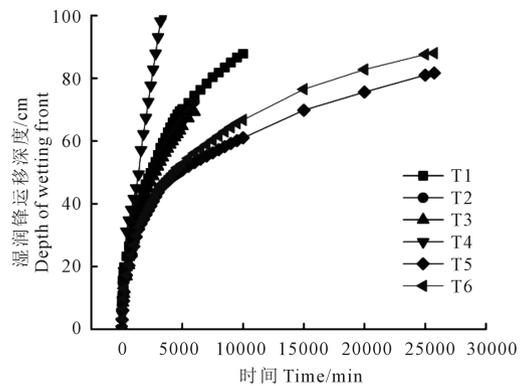


图 3 各处理湿润锋随时间的变化

Fig.3 Change of wetting front with time of each treatment

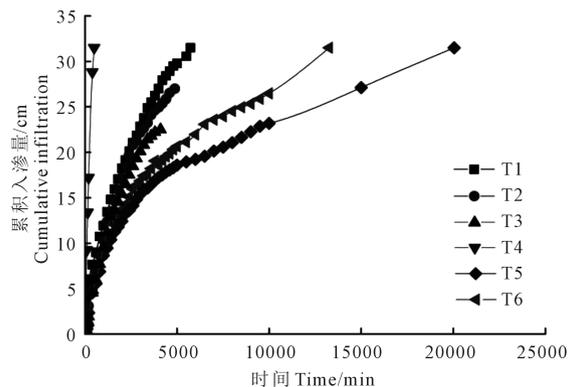


图 4 各处理累积入渗量随时间的变化

Fig.4 Change of cumulative infiltration with time of each treatment

2.4 夹层对累积入渗量与湿润锋之间关系的影响

不同处理在入渗过程中累积入渗量(I)与湿润锋运移距离(Z_f)之间呈线性关系,如表3所示,二者之间存在显著的线性关系($R^2 > 0.99$),其中系数 a 为直线斜率,可表示为湿润锋推进单位距离所需水量,也能反映出土壤剖面的持水能力。但由于灌水量不同和夹层位置与厚度关系,其 a 值变化幅度不同,也反应出了不同处理在持水能力上的差距,以T4处理为例,由于在同一时刻的累积入渗量与湿润锋推进距离相差较小,因此 a 值较大,T5处理由于夹层上移后阻止水流继续向下渗流的作用,使入渗时间相对较长,在下渗水量还没有达到它最大的持水能力之前,即表现为持水能力相对较低。因此,累积入渗量与湿润锋之间关系曲线也反映出了土体的整体持力能力,为制定合理的灌溉制度提供了一定参考依据。

表3 各处理累积入渗量(I)和湿润锋运移距离(Z_f)的线性回归参数

Table 3 Linear regression parameters of cumulative infiltration (I) with wetting front migration distance (Z_f) of each treatment

处理 Treatment	$I = aZ_f + b$		R^2
	a	b	
T1	0.4603	-2.7518	0.9963
T2	0.4651	-3.2838	0.9923
T3	0.4243	-2.3322	0.9971
T4	0.8993	0.6224	0.9991
T5	0.4118	-2.3074	0.9921
T6	0.4298	-2.1399	0.9956

2.5 不同处理剖面含水率的变化

各处理不同土层深度土壤剖面含水率随时间的变化如图5所示。在入渗过程中,用取土烘干法与同一时刻数据自动记录采集系统的剖面含水率对比,发现有的探针所测得的剖面含水率略高,但不影响整个入渗过程土壤水分的变化趋势^[14]。随着湿润锋向下推进,各处理不同深度土层剖面含水率存在波动,但表现出各土层的土壤含水率都呈急剧上升并趋于稳定的规律。由于处理不同,各土层土壤含水率趋于稳定的时间表现出明显的差异,如T4处理,各层土壤含水率在入渗开始后第5天逐渐趋于稳定,在稳定时间上均早于其它处理。

通过对比T1~T3处理的剖面含水率随时间的变化趋势可以发现,各处理虽然各土层结构相同,由于夹层的存在和灌水量的不同,虽然夹层土壤的含水率均呈先增大后减小的变化趋势,但随着灌水量减小含水率增大的时间滞后,如T1处理在第5天

达到最大值,T2处理和T3处理分别在第6天和第8天达到最大值,且随着灌水量的减小,下降趋势减缓。其它土层中除90 cm深度外,变化趋势与夹层变化一致,由于灌水量不同,灌水量越小,最深处土层(90 cm)变化越小。同时可以看出,通过打孔打破夹层土壤后,明显改善了上下层土壤剖面含水率的分布情况,在灌水后,随着灌后时间的推移,T4处理各土层土壤含水率明显增大,在第4天后,各土层含水率开始下降且趋于稳定。而在相同灌水量条件下,夹层上移与厚度增大情况下的土壤含水率变化规律一致,但上移处理的夹层土壤含水率的峰值出现时间晚于加厚处理。

分析发现,不同灌水量条件下,灌水量($3\ 150\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)越大,表层土壤含水量迅速增大,随着灌水持续,50 cm土层含水率开始增大,当灌水入渗到夹层后,夹层土壤含水率开始增大,同时上层含水量迅速降低,夹层土壤含水量在达到峰值后迅速降低,在灌水8天后,最底层(90 cm)土壤含水率开始提高。反之,当灌水量($2\ 700\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)减小时,虽然在灌水初期时各深度土壤含水率变化趋势与灌水量为 $3\ 150\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时一致,但受灌水量影响,从夹层及以下土层的含水率增大时间延后。同理,当灌水量为 $2\ 250\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,灌水5天后的各深度土壤含水率变化趋势均一致,但之后在夹层(70 cm)和底层(90 cm)土壤含水率变化明显,其中夹层土壤在第6天达到峰值后开始降低,但降低幅度很小,而最底层在灌水开始至灌水后12天才出现升高趋势。上述结果表明夹层对表层土壤的含水率影响较小,但对夹层的上下层土壤含水率影响较大,即灌水量偏小时,水分很难通过夹层下渗至更底层,且夹层厚度增加相比夹层位置上移对夹层的上下层土壤含水率的影响更大。

2.6 模拟分析

应用Kostiakov模型对各处理土壤实测入渗量 I 与入渗时间 t 之间的关系进行拟合,模拟结果如表4所示,二者之间呈幂函数关系,Kostiakov模型对各处理拟合的 R^2 值除T5处理(0.8986)外,均在0.93以上,同时RRMSE均小于0.25,说明Kostiakov模型能够较好地模拟盐碱地不同剖面构型夹层土壤水分的入渗特性。

3 讨论

3.1 夹层土壤对含水率的影响

田间土壤剖面含水率很少呈均一分布状态,总体上层状土壤的结构可分为夹层和覆层,夹层是指

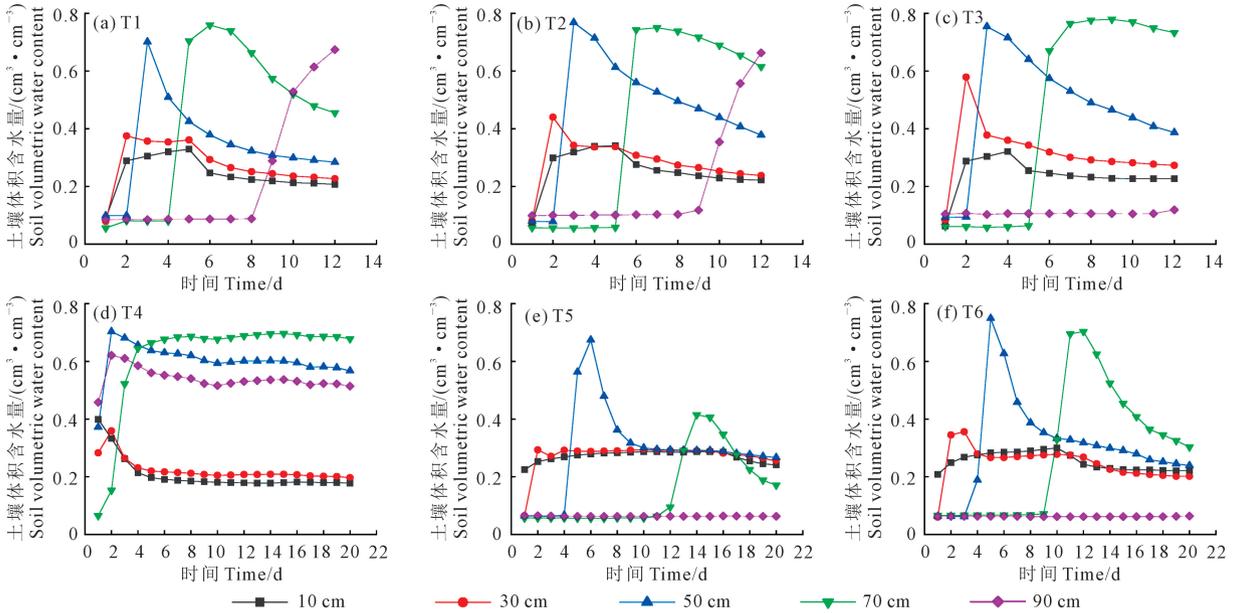


图 5 各处理土壤剖面含水率随时间的变化

Fig.5 Change of water content in soil profile with time of each treatment

表 4 Kostiakov 模型模拟不同处理的入渗过程

Table 4 Infiltration simulation by Kostiakov model of different treatments

处理 Treatment	$I(t) = kt^n$		R^2	RRMSE
	k	n		
T1	0.2642	0.5567	0.9829	0.071
T2	0.0327	0.8142	0.9728	0.103
T3	0.0191	0.8759	0.9873	0.121
T4	0.2928	0.7525	0.9830	0.246
T5	0.0333	0.7440	0.8986	0.077
T6	0.0554	0.6985	0.9399	0.077

在均质土体中的夹粘土层或者夹砂层,覆层是指粗质地土层覆盖细质地土层,正是由于土壤质地的不均一性,导致了水分在入渗过程中的差异性^[15]。如当均质土壤为松沙土和轻壤土,层状土为松沙土夹轻黏土和轻壤土夹轻黏土时,通过不同灌水量试验发现,由于处在 35~45 cm 深度之间的轻黏土夹层的持水能力高,其质量含水率(18%~28%)远大于下部松沙土层的质量含水率(6%~9%)^[16],当土壤剖面为传统的上土下砂结构时,土壤剖面含水率出现明显的分层,60 cm 以下黄河泥沙层的平均剖面含水率为 0.32 cm³·cm⁻³,仅为 60 cm 以上土壤层的 0.63 倍^[14],夹心结构导致水分的入渗速率减缓,延长入渗时间,使上层土壤含水率提高了 22.52%~29.33%。本研究由于未采用定水头入渗,而是采用大田实际灌水定额进行灌水入渗试验,研究结果显示,在夹层结构相同灌水量不同时,夹层对表层土壤的含水率影响较小,但对夹层上下层的土壤含水

率影响较大,即当灌水量偏小时,水分很难通过夹层下渗至更底层。这与涂安国等^[12]和董倩倩等^[17]的研究结果一致,当细质土在下层时,土壤的饱和导水率显著低于粗质地土壤在下层时的有效饱和导水率,并且主要由细质地土壤导水特性决定,而采用不同的灌水方式,如地表滴灌、地下滴灌、沟灌、畦灌等技术时,其不同滴头流量、滴灌量、滴灌带埋深、沟灌面积等均会对土壤入渗时的水分运动规律也会产生影响^[18-19],同时,长期耕作形成的犁底层也可导致土壤水力性质严重退化,其饱和导水率(6.61 cm·d⁻¹)仅为耕作层的 1/10,且增加其剖面储水量^[20]。

为探明与南疆棉花种植大田更为接近的实际土壤水分运动规律,本研究采用的漫灌方式类似于大田的畦灌方式,前人研究表明,在畦灌方式下,灌溉后的土壤含水率呈现出沿纵向分层现象,即深层土壤的含水率最大,且随着灌水量的增加,最大含水率纵向深度随之增加^[21]。在土壤质地一致时,当灌水量分别为 3 150 m³·hm⁻²(T1)、2 700 m³·hm⁻²(T2)和 2 250 m³·hm⁻²(T3)时,在纵向深度 90 cm 处的土层含水量中,灌水停止后相同时间段,T1 比 T2 的土壤含水率高出 1.53%,而 T3 的土壤含水率在停止灌水后的 8 d 时间内变化很小,没有像 T1 和 T2 的含水率有明显增大的趋势,表明灌水量的多少直接影响了水分入渗的纵深度与深层土壤含水率。而在夹层土壤发生变化时,如当夹层的位置(T5)和厚度变化时(T6),在灌水量相同的情况下,

夹层厚度增加相比夹层位置上升对土壤含水量的影响更大,这也与王晓彤等^[14]的研究结论一致。针对夹层对土壤含水率的阻碍作用,本文借鉴 Atkinson 等^[22]和张翼夫等^[23]打孔灌沙的方法,通过打孔打破重盐碱地夹层土壤,然后再灌沙,以此提高土壤通透性,改善土壤环境,其水分入渗效果(T4处理)显著优于其它处理,提高了夹层的上下层土壤的含水率。

3.2 夹层土壤对湿润锋与累积入渗量的影响

对于层状土壤水分运动特性的研究,前人多采用室内土柱或土箱入渗与蒸发试验,并集中于对夹砂层、土层排序、覆盖层厚度等对土壤水分特性影响的研究^[24]。无论细质土覆盖粗质土,还是粗质土覆盖细质土,即当上下两层土壤不同时,整体均会表现为降低入渗率和阻碍水分入渗^[25]。如李怀恩等^[26]通过土箱层状土分层试验和卢修元等^[27]在室内进行的层状土的垂直一维入渗试验,均认为夹层对入渗过程的影响表现为减渗作用,且上层土的饱和和导水率决定了下层土中湿润锋的平均推进速度,并使夹层土壤的入渗表现为一个具有较小的入渗率和较小的湿润锋推进速度的稳渗阶段,即入渗率趋于稳定^[28]。本文中夹层土壤入渗率的变化规律与之一致,即在灌水量不同时,如 T1、T2、T3 处理,虽然在相同夹层质地条件下灌水量越大,入渗率越大,其平均入渗率分别为 0.062、0.037、0.026 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$,而夹层土壤的入渗率分别为 0.570、0.426、0.420 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$,表现出层状土排序相同灌水量不同时,受灌水量重力作用的影响,其入渗率也随着灌水量的减少而降低。而对于不同层状土厚度或位置,夹层对土壤水分入渗同样表现出明显的差异,如 T5、T6 处理,对比 T1 处理,分别上移了 10 cm 和增厚了 5 cm,其夹层土壤的入渗率分别为 0.126、0.078 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$,说明夹层加厚的阻渗效果优于夹层上移处理,而不同的层状土壤质地,其入渗的特性也会表现出差异,这与李毅等^[29]的研究结果一致。同理,夹层土壤入渗率的变化势必使湿润锋和累积入渗量产生变化,如李毅等^[29]研究发现,在夹层位置为距土壤表层 5~10、10~15、20~15 cm 时,湿润锋到达夹层界面的时间与对应的累积入渗量均随夹层位置和土层排序的差异而变化。当夹层的层位越靠上,湿润锋到达夹层分界线的时间越短,相应的累积入渗量也越小。相反,当夹砂层的层位越深,使入渗率的曲线整体抬高,导致累积入渗量和湿润锋在水分进入到夹层界面前随时间延长而呈非线性递增趋势。

在本研究中,当夹层层位相同、灌水量不同时,

则水分到达夹层界面的时间随着灌水量的增大而缩短,其中 T1、T2、T3 处理到达夹层界面的时间分别为 3 474、3 957、4 179 min。当夹层位置与厚度发生变化时,其湿润锋和累积入渗量也会随之变化,如 T5 处理上移和 T6 处理加厚后,水分下渗到夹层界面的时间分别为 4 730 min 和 7 456 min,这也与许尊秋等^[30]、李进法等^[31]和吴叔赢等^[32]结论一致,说明夹层的质地、位置和厚度等因素变化对土壤水分入渗均会产生显著影响。基于夹层土壤的物理特性^[33],Atkinson 等^[22]和刘晓波等^[34]研究发现,通过打孔能够疏松土壤,改善土壤环境,而灌沙能提高土壤通透性,有利于大直径土壤微粒的形成^[35]。本文中对 T4 处理采用打孔灌沙措施后发现,与其它处理相比,该处理各土层土壤含水率相对比较稳定,其稳定入渗率最高(3.509 $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$),且从入渗开始到入渗结束的总用时最短,仅 495 min,其对改善夹层的减渗效果和促进水分入渗的效果明显,但由于下渗速度过快,需要制定合理的灌溉定额,以避免产生深层渗漏造成水资源浪费。

综上所述,夹层土壤具有一定的阻水与减渗作用,能提高夹层上层土壤的持水能力,而不同的夹层质地与位置等变化均会影响水分下渗,本研究通过对不同灌水量和夹层的位置与厚度条件下的水分入渗特性分析,验证了多数前人的研究结论,同时由于重盐碱地的特殊理化特性,在下渗停止后湿润锋和累积入渗量总用时高于多数研究者的分析结果,这也说明了该地区土壤条件的特殊性,同时,本研究探究打孔灌沙措施能否作为南疆地区一种新的夹层土壤的改良措施,结果表明打孔灌沙可以作为一种有效的改良措施来改善土壤入渗特性,缩短灌溉水下渗时长,增大各土层土壤含水率,降低夹层土壤的阻水效果,因此,在南疆重盐碱地夹层土壤比较普遍的地区,打孔灌沙措施具有推广应用前景。但应注意到,由于打孔灌沙试验研究虽然采用了分层土壤装填,土壤经过扰动后与大田实际情况存在差异,另外对于打孔孔径、密度等参数对夹层土壤水分入渗特性还未进行深入研究,因此在后续的研究中将会逐步考虑与实施。

4 结 论

1) 灌水量对重盐碱地夹层土壤水分入渗特性的影响显著,土壤水分入渗持续时间和湿润锋运移距离随灌水量的增加而增加,当灌水量为 3 150 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,湿润锋运移深度为 87.8 cm,而灌水量为 2 250 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,湿润锋运移深度仅为 69.2 cm,

并未渗透夹层土壤。

2) 夹层位置上移至距土表 50 cm 处或夹层厚度增加为 15 cm 时,对水分入渗的阻滞作用更明显,从入渗开始至 6 000 min 时,T5 和 T6 处理的湿润锋运移深度分别为 T1 处理的 71.4% 和 77.3%,而打孔灌沙处理(T4)渗透整个土柱(1 m)仅用时 3 400 min,可显著提高夹层土壤的入渗特性。

3) 夹层位置在 60~80 cm、厚度为 10~15 cm 时,灌水量过低或夹层上移与加厚均不利于水分下渗,采用打孔灌沙措施后,当灌水量在 $3\ 150\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上时能显著改善重盐碱地夹层土壤的水分入渗特性。

参考文献:

- [1] 王健,李傲瑞.我国盐碱地改良技术综述[J].现代农业科技,2019,(21):182-183,185.
WANG J, LI A R. A summary of improvement techniques of saline-alkali land[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2019, (21): 182-183, 185.
- [2] 邵华伟,孙九胜,胡伟,等.新疆盐碱地分布特点和成因及改良利用技术研究进展[J].黑龙江农业科学,2014,(11):160-164.
SHAO H W, SUN J S, HU W, et al. Research progress on distribution characteristics, causes and improved utilization technology of saline-alkali land in Xinjiang [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2014, (11): 160-164.
- [3] LI X P, HANG S X, SALIFU K F. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review[J]. Environmental Reviews, 2014, 22(1): 1-10.
- [4] WILSON M G, SASAL M C, CAVIGLIA O P. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: effect on early wheat growth[J]. Geoderma, 2013, 192(5): 354-361.
- [5] SI B, DYCK M, PARKIN G. Flow and transport in layered soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2017, 91(2): 127-132.
- [6] COLMAN E A, BODMAN G B. Moisture and energy conditions during downward entry of water into moist and layered soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1945, 9(C): 3-11.
- [7] MILLER D E, GARDNER W H. Water infiltration into stratified soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, 26(2): 115-119.
- [8] ALFNES E, KINZELBACH W, AAGAARD P. Investigation of hydro-geologic processes in a dipping layer structure: 1. The flow barrier effect [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 69 (3/4): 157-172.
- [9] HUANG M B, LEE B S, AMIN E, et al. Infiltration and drainage processes in multi-layered coarse soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2): 169-183.
- [10] HILL D E, PARLANGE Y J. Wetting front instability in layered soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36(5): 697-702.
- [11] 廖振棋,范军亮,裴青宝,等.不同灌水量和灌水器埋深下单坑渗灌红壤水分入渗特性及其模拟[J].灌溉排水学报,2022,41(1):110-118,146.
LIAO Z Q, FAN J L, PEI Q B, et al. Impact of burying depth of emitters in pit irrigation on water infiltration in red soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 110-118, 146.
- [12] 涂安国,聂小飞,李英,等.层状红壤水分入渗特征试验与模拟[J].排灌机械工程学报,2021,39(12):1243-1249.

- TU A G, NIE X F, LI Y, et al. Experimental and simulation study on water infiltration characteristics of layered red soil[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39 (12): 1243-1249.
- [13] 汪顺生,陈春来,王爱滨,等.宽垄沟灌土壤水分累积入渗特性试验研究及模拟[J].排灌机械工程学报,2021,39(5):501-508.
WANG S S, CHEN C L, WANG A B, et al. Experimental study and simulation on cumulative infiltration characteristics of soil water under wide ridge furrow irrigation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(5): 501-508.
- [14] 王晓彤,胡振琪,赖小君,等.黏土夹层位置对黄河泥沙充填复垦土壤水分入渗的影响[J].农业工程学报,2019,35(18):87-94.
WANG X T, HU Z Q, LAI X J, et al. Influence of clay interlayer position on infiltration of reclaimed soil filled with Yellow River sediment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(18): 87-94.
- [15] 王全九,汪志荣,张建丰,等.层状土入渗机制与数学模型[J].水利学报,1998,(S1):77-80.
WANG Q J, WANG Z R, ZHANG J F, et al. Infiltration mechanism of layered soil and its simulation model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (S1): 77-80.
- [16] 赵宇龙,李明思,陈绍民,等.滴灌条件下层状土壤滞盐作用的试验研究[J].灌溉排水学报,2015,34(6):29-34.
ZHAO Y L, LI M S, CHEN S M, et al. Retardation effect of layered soil to salt transfer under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(6): 29-34.
- [17] 董倩倩,许忠宇,范文波,等.夹心结构水盐运移及分布规律[J].排灌机械工程学报,2021,39(4):419-425.
DONG Q Q, XU Z Y, FAN W B, et al. Soil water-salt transport and distribution characteristics in sandwich structure [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39 (4): 419-425.
- [18] 张志刚,李宏,李疆,等.地表滴灌条件下滴灌量对土壤水分入渗、再分布过程的影响[J].农业现代化研究,2016,37(1):174-181.
ZHANG Z G, LI H, LI J, et al. Effects of irrigation amount on soil water infiltration and redistribution under drip irrigation[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(1): 174-181.
- [19] 张松,李和平,郑和祥,等.地理滴灌点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J].节水灌溉,2017,(1):25-27,32.
ZHANG S, LI H P, ZHENG H X, et al. A study on soil water movement law of point source infiltration under buried drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2017, (1): 25-27, 32.
- [20] 顾思敏,江思珉,栗现文,等.犁底层对土壤剖面盐分淋洗的影响及优化洗盐模拟[J].节水灌溉,2022,(8):60-67,72.
GU S M, JIANG S M, LI X W, et al. Effect of plow pan on salt leaching in soil profile and salt leaching optimization simulation [J]. Water Saving Irrigation, 2022, (8): 60-67, 72.
- [21] 贾瑞琪,刘华,李宏,等.漫灌方式下幼龄枣树林地土壤水分的运移特征[J].安徽农业大学学报,2013,(2):219-224.
JIA R Q, LIU H, LI H, et al. Characteristics of soil water transportation in young *Ziziphus jujuba* forest land under flood irrigation [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2013, (2): 219-224.
- [22] ATKINSON J L, MCCARTY L B, BRIDGES W C. Effect of core aeration frequency, area impacted, and topdressing rate on turf quality and soil physical properties[J]. Agronomy Journal, 2012, 104 (6): 1710-1715.