

DOI: 10.11766/trxb202006280339

丁运韬, 程煜, 张体彬, 姬祥祥, 董勤各, 冯浩, 张相柱. 滴灌灌水下限对夹砂层农田土壤水盐分布和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (3): 733–744.

DING Yuntao, CHENG Yu, ZHANG Tibin, JI Xiangxiang, DONG Qin'ge, FENG Hao, ZHANG Xiangzhu. Effects of Different Thresholds of Mulched Drip Irrigation on Water and Salt Distribution and Water Use Efficiency of Maize in a Sand-Layered Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (3): 733–744.

滴灌灌水下限对夹砂层农田土壤水盐分布和玉米生长的影响*

丁运韬^{1, 2, 3}, 程煜^{1, 2, 3}, 张体彬^{1, 3, 4†}, 姬祥祥^{1, 2, 3}, 董勤各^{1, 3, 4},
冯浩^{1, 3, 4}, 张相柱⁵

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 5. 巴彦淖尔市水利科学研究所, 内蒙古巴彦淖尔 015000)

摘要: 为探明滴灌灌水下限对夹砂层土壤水盐分布和作物生长的影响, 在河套灌区开展连续 2 年的田间试验。供试土壤 60~100 cm 深度为砂土层, 供试作物为玉米。基于土壤基质势, 设置 5 个滴灌灌水下限: -10 kPa (S1), -20 kPa (S2), -30 kPa (S3), -40 kPa (S4) 和 -50 kPa (S5)。结果表明夹砂层显著影响土壤水盐运移。0~60 cm 根层含水量较低, 而砂层较高; 土壤盐分受水分影响, 更多聚集在砂层。灌水下限显著影响土壤水盐分布和各层储量, 下限越高, 根层土壤含水量越高、含盐量越低, 而砂层及以下处理间差异不显著。S1、S2 和 S3 处理玉米籽粒产量显著高于 S4 和 S5 ($P < 0.05$), 且前三者之间差异不显著, S3 水分利用效率最高。因此, 针对河套灌区夹砂层农田, 建议膜下滴灌灌水下限为 -30 kPa。

关键词: 夹砂层; 土壤水势; 膜下滴灌; 根区水盐环境; 水分利用效率

中图分类号: S156; S275 文献标志码: A

Effects of Different Thresholds of Mulched Drip Irrigation on Water and Salt Distribution and Water Use Efficiency of Maize in a Sand-Layered Soil

DING Yuntao^{1, 2, 3}, CHENG Yu^{1, 2, 3}, ZHANG Tibin^{1, 3, 4†}, JI Xiangxiang^{1, 2, 3}, DONG Qin'ge^{1, 3, 4}, FENG Hao^{1, 3, 4}, ZHANG Xiangzhu⁵

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling,

* 国家重点研发计划项目 (2017YFC0403303)、国家自然科学基金项目 (51879224, 51509238) 和陕西省重点研发计划一般项目 (2019NY-001) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0403303), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 51879224, 51509238), and the Key Research and Development Program of Shaanxi Province (No. 2019NY-001)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangtb@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 丁运韬 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉和水土资源高效利用研究。E-mail: 852459496@qq.com

收稿日期: 2020-06-28; 收到修改稿日期: 2021-01-11; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-04-07

Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Area of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Water Conservancy Research Institute of Bayannur City, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract: 【Objective】 Sand-layered soil is widely distributed in the Hetao Irrigation District of Inner Mongolia, and its water and salt migration processes are more complicated than that in a homogeneous soil. Therefore, this study was designed to investigate the effects of different thresholds of drip irrigation on water and salt re-distribution in a sand-layered soil profile and on crop growth and water use. 【Method】 A two-year field experiment was conducted in a sand-layered soil field at the Hetao Irrigation District during spring maize growing seasons in 2017 and 2018. For this soil profile, the depth between 60-100 cm was sand-layer. The experiment included 5 irrigation thresholds under mulched drip irrigation, which controlled the threshold values of soil matric potential (SMP) at -10 kPa(S1), -20 kPa(S2), -30 kPa(S3), -40 kPa(S4), and -50 kPa(S5) respectively, for spring maize planting. The soil volumetric water content, water storage, salt distribution and storage in 0-120 cm soil profile, and maize grain yield and water use efficiency were analyzed. 【Result】 The presence of sand layer affected the water and salt movement in the soil profile. This resulted in a significant difference in the vertical distribution of water and salt in the soil profile. The soil volumetric water content was relatively lower in the root layer between 0-60 cm depth, but higher in the sand layer between 60-100 cm depth. The soil volumetric water content in the sand layer was always kept around the level of field water capacity during maize's growing seasons. Due to the water movement in the soil profile, more salt was concentrated in the sand layer. The abrupt transition points of distribution of water and salt in the profile appeared at an upper boundary of the sand layer. These distribution characteristics of water and salt were consistent during different growth periods. Besides, different thresholds of drip irrigation significantly affected the distribution and storage of soil moisture and salinity in different soil layers. At higher soil volumetric water content, the lowest soil $EC_{1:5}$ (electrical conductivity of 1:5 soil/water extract) were observed in the root layer. Nevertheless, the difference between the soil moisture content and salt content in the sand layer and below was not significant. The grain yields of maize treated with S1, S2, and S3 were significantly higher than those of S4 and S5 ($P < 0.05$), but the difference among the former three was not significant. Also, the water use efficiency (WUE) of maize increased first and then decreased with the decrease in irrigation thresholds, and S3 had the highest WUE. 【Conclusion】 Lower irrigation thresholds favored grain yield relative to higher thresholds. Considering the water and salt environment in the root layer and WUE, it is suggested that the threshold of irrigation should be -30 kPa when cropping spring maize in this sand-layered field using mulched drip irrigation.

Key words: Sand-layered soil; Soil matric potential; Mulched drip irrigation; Water and salt environment in the root layer; Water use efficiency

内蒙古河套灌区总土地面积为 $119 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 设计灌溉面积为 $73 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 是亚洲最大的首制自流灌区和全国三个特大型灌区之一, 是我国重要的商品粮、油生产基地。研究并优化河套灌区节水灌溉模式, 保障灌区农业生产可持续发展, 对我国旱区农业生产甚至全国粮食安全意义重大。作为黄河冲积平原, 河套灌区内层状土壤农田分布广泛, 其中以 40~100 cm 深度内不等的夹砂层土壤居多^[1]。与均质土壤相比, 夹砂层土壤水分、盐分运动更为复杂。近年来, 随着河套灌区日益严重的土壤盐渍化现状, 对夹砂地农田土壤水盐运动的研究有助于河套灌区农田水盐管理技术的改善和节水灌溉技术的

推广。

国内外学者在均质土壤水分运移研究的基础上, 对夹砂层土壤的水分入渗和运移规律等多个角度进行了详细的讨论, 李毅等^[2]通过对湿润锋、累积入渗量和剖面含水量的观测发现, 夹层位置和土壤质地变化对层状土壤入渗规律有明显影响; 为了进一步探究砂层质地、埋深、砂层厚度对水分入渗过程的影响, 范严伟等^[3]利用 Hydrus-1D 对水分运动过程进行了模拟, 结果表明砂层质地、埋深和砂层厚度是影响土壤剖面含水量的主要因素; 现有研究已涉及了土壤质地、容重^[1]、初始含水量^[4]等因素对土壤水分运移特征的影响。夹砂层土壤水分入

渗和盐分运移规律与均质土壤有明显差异, 相对于层状土壤, 均质土壤的持水能力更差, 水流速度更快^[5], 夹砂层在减小土壤水分下渗速率, 提高上层土壤的水分含量方面有着积极作用^[6-8], 但是以上结论是通过室内试验研究得出的, 点尺度土壤样本的室内稳态试验得到的结论不一定适用于天然条件下的农田土壤水分运动^[9]。也有研究指出, 夹砂地农田土壤水盐运移规律除了与具体土壤剖面层次有关以外, 还与灌溉方式和种植作物等也密切相关^[9-10]。因此, 想要明晰河套灌区夹砂土壤水盐运移规律, 还需针对具体土壤类型、灌溉方式和作物来开展具体的研究。

滴灌作为一种先进的节水灌溉技术, 可以提高水分利用效率和作物产量^[11], 与覆膜栽培结合之后的膜下滴灌技术在干旱、半干旱地区盐碱化治理和节水灌溉方面具有明显优势, 已在包括我国在内的世界范围内得到大面积应用。近几年, 随着河套灌区地表水资源的日益紧缺和土壤盐渍化的加剧, 膜下滴灌技术在河套灌区逐步得到重视。前人就膜下滴灌下玉米耗水规律^[12]及水分生产率^[13-14]、作物系数^[15]、根系分布^[16]等方面开展了一系列的工作, 但多是均质土壤, 对夹砂层对土壤水盐运移的影响研究相对较少。

本研究针对河套灌区夹砂地农田, 开展了连续 2 年的田间试验, 通过设置不同膜下滴灌灌水下限, 分析不同膜下滴灌条件下夹砂层土壤水盐分布和作物产量与水分利用状况, 以期进一步完善夹砂层

土壤水盐运移与滴灌调控理论, 为膜下滴灌技术在河套灌区的推广提供科学依据, 助推灌区节水农业发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验于 2017 和 2018 年的春玉米生长季 (5—9 月) 在河套灌区曙光试验站 (巴彦淖尔市临河区八岱乡曙光村, 40°46'N, 107°24'E, 海拔 1 039 m) 进行。试区地处典型的温带大陆性干旱气候区, 多年平均降水量约为 135 mm, 年蒸发量在 2 100~2 300 mm 之间, 年均风速为 2.8~2.9 m·s⁻¹。全年日照充足, 时数为 3 190~3 260 h, 年平均气温为 6.9℃, 昼夜温差大。其中 1 月份均温为 -14℃~11℃, 7 月份均温为 22℃~24℃, 0~20 cm 土层平均地温为 9.4℃。

试区土壤属于黄河灌淤土, 土壤剖面分层明显。0~60 cm 为壤土层, 平均 EC_{1:5} (土水比 1:5 浸提液电导率) 为 1.1 dS·m⁻¹, pH 为 8.4; 60~100 cm 为砂土层 (含 80~100 cm 为壤质砂土), 平均 EC_{1:5} 为 0.56 dS·m⁻¹, pH 为 8.2; 100~120 cm 为砂壤土, 平均 EC_{1:5} 为 0.49 dS·m⁻¹, pH 为 8.2, 其他层次的土壤特性见表 1。选择 3 个主要层次 (0~20 cm 壤土, 60~80 cm 砂土, 100~120 cm 砂壤) 利用离心机法测定水分特征曲线 (图 1), 并利用 RETC 软件, 选择 van Genuchten 模型, 进行参数拟合。

表 1 研究区域土壤理化性质

Table 1 The physicochemical characteristics of soil in the study area

土层 Soil layer/cm	颗粒组成 Particle size/%			土壤质地 Soil texture	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	田间持水量 Field water capacity /(cm ³ ·cm ⁻³)	EC _{1:5} /(dS·m ⁻¹)	pH
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay					
0~20	32.2	47.8	20.0	壤土	1.44	0.29	1.76	8.7
20~40	25.2	49.8	25.0	壤土	1.43	0.31	0.81	8.3
40~60	29.7	47.2	23.1	壤土	1.45	0.31	0.65	8.2
60~80	93.3	4.2	2.5	砂土	1.51	0.22	0.61	8.1
80~100	78.4	14.7	6.9	壤砂	1.48	0.22	0.50	8.2
100~120	55.7	30.3	14.0	砂壤	1.42	0.30	0.49	8.3

注: EC_{1:5} 为土水比 1:5 浸提液电导率。Note: EC_{1:5}, the electrical conductivity of soil/water 1:5 extract.

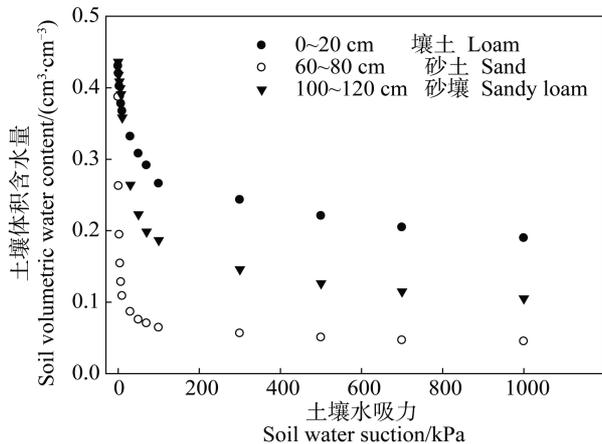


图1 代表性土层中土壤体积含水量与土壤水吸力的散点分布图

Fig. 1 Scatter plot of soil volumetric water contents and soil water suctions in the main layers

试区地下水埋深在2~3.5 m之间,随周边农田引黄灌溉情况波动。试验田每年的秋季采用引黄水漫灌秋浇。降水量和水面蒸发量均采用直径为20 cm的标准雨量筒和蒸发皿在试验地附近地面80 cm高度处测定,测定时间为每天上午8:00。2017和2018年玉米生育期内(5—9月)累积降雨量分别为37 mm和154 mm;累积水面蒸发量分别为821 mm和793 mm(图2)。对照历史气象数据,2017为干旱年,而2018年为湿润年,蒸降比分别为22.2和5.1。

1.2 试验布置

供试作物为春玉米,品种选择为当地主栽品种

“西蒙6号”。田间种植采用“一膜单管双行”的种植方式,滴灌带间距100 cm,地膜宽70 cm。玉米采用宽窄行的种植方式,膜下窄行30 cm,膜间宽行70 cm,玉米株距30 cm(图3)。播种前覆盖地膜,地膜为高压聚乙烯膜,厚度8 μm。播种深度5 cm,2017年播种时间为4月27日,2018年为4月28日,分别于2017年9月8日和2018年9月10日收获,生育期分别为134 d和135 d。

田间试验设置5个灌水下限处理,分别控制滴头正下方20 cm处土壤基质势下限为-10 kPa(S1)、-20 kPa(S2)、-30 kPa(S3)、-40 kPa(S4)和-50 kPa(S5)。每处理3个重复,共计15个小区,小区大小为4 m×15 m,各小区之间设置1 m宽的缓冲区以减少土壤水分侧渗。每个处理安装一套独立的滴灌首部控制系统,包含阀门、施肥罐、过滤器、水表、压力表等,以及12条滴灌带(每小区4条,控制8行玉米)。通过安装在滴头正下方20 cm深度处的真空表式负压计进行土壤基质势监测(图3),每天9:00和15:00进行负压计读数,一旦达到所设定阈值,立即启动滴灌。灌水定额参考当地最大水面日蒸发量,设定为10~20 mm。各处理玉米生育期内灌溉次数和灌水量见表2。

试验地基肥采用尿素、磷酸二铵和硫酸钾按照N、P、K分别为150 kg·hm⁻²、180 kg·hm⁻²和45 kg·hm⁻²的施用量均匀撒施于地表,之后翻耕。玉米生育期内追施150 kg·hm⁻²的氮肥,采用水溶性较

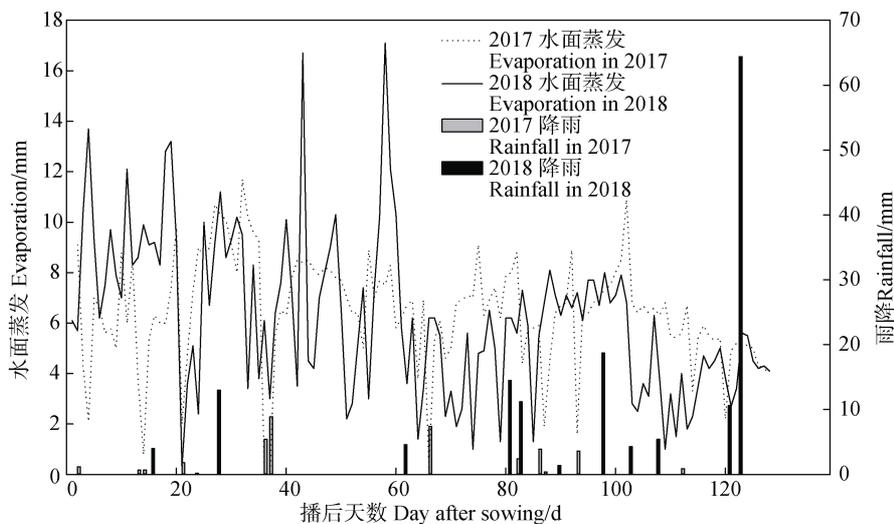


图2 2017年和2018年玉米生育期水面蒸发量与降雨量

Fig. 2 Evaporations and rainfall during growing seasons of spring maize in 2017 and 2018

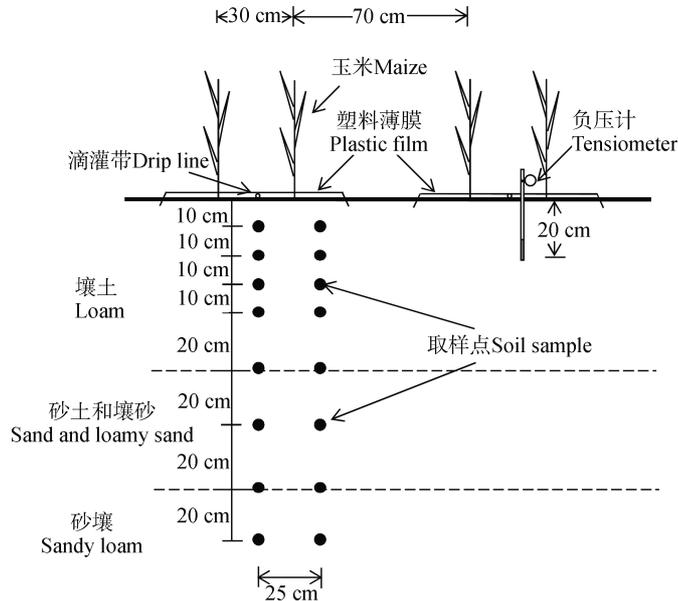


图3 膜下滴灌春玉米种植模式、负压计埋设和取样点位置示意图

Fig. 3 Dimensions of planting pattern, the tensiometer installation and positions of soil sampling under mulched drip irrigation for cropping spring maize

表2 不同灌水下限处理下春玉米膜下滴灌灌水次数、累积灌溉量

Table 2 Irrigation times and amount of spring maize under mulched drip irrigation with different thresholds

处理 Treatment	2017年 Year 2017		2018年 Year 2018	
	灌溉次数 Irrigation times	灌溉量 Irrigation amount/mm	灌溉次数 Irrigation times	灌溉量 Irrigation amount/mm
S1 (-10 kPa)	33	490	33	440
S2 (-20 kPa)	26	365	26	310
S3 (-30 kPa)	23	300	21	240
S2 (-40 kPa)	16	200	17	210
S5 (-50 kPa)	10	130	9	100

好的尿素，于灌水前溶于施肥罐中，随灌水施入，且保证各处理施肥量一致。其他田间管理，如除草、病虫害防治等同周边农田一致。

1.3 测定指标与方法

分别在春玉米拔节期(2017年6月30日和2018年6月27日)、抽雄期(2017年7月15日和2018年7月15日)、灌浆期(2017年7月31日和2018年8月5日)和成熟期(2017年9月8日和2018年9月10日)取土，取样位置见图3。部分土样在105℃下烘干至恒重，测定质量含水量，利用容重计算得出土壤体积含水量，各深度土壤含水量由两个取样位置计算平均值得出。剩余土样经自然风干、磨碎后过2 mm筛，称取10 g，加去离子水50 mL，

制备土水比1:5浸提液，用电导率仪(DDS-11A，上海济成分析仪器有限公司)测定 $EC_{1:5}$ 。

剖面土壤贮水量(体积含水量，%)按照以下公式计算：

$$W = \sum (W_i \times D_i \times H_i / 10) \quad (1)$$

式中， W 为土壤贮水量，mm； W_i 为某一层土壤质量含水量， $g \cdot g^{-1}$ ； D_i 为某层土壤容重， $g \cdot cm^{-3}$ ； H_i 为土壤层次厚度，cm。

土壤电导率转化为土壤全盐量，计算公式^[1]为：

$$S_t = EC_{1:5} \times 3.7657 - 0.2405 \quad (2)$$

式中, S_i 为土壤全盐量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; $\text{EC}_{1:5}$ 为土水比 1:5 比浸提液电导率, $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

各土层盐分储量计算公式^[17]为:

$$S_a = \sum (S_i \times D_i \times H_i / 10) \quad (3)$$

式中, S_a 为某一土层土壤盐分储量, $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$; D_i 为该土层土壤容重, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; H_i 为该土层厚度, cm 。

水分利用效率 (WUE) 的计算公式为:

$$\text{WUE} = Y/\text{ET} \quad (4)$$

式中, WUE 为水分利用效率, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$; Y 为单位面积玉米产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; ET 为玉米生育期耗水量, mm , 用水量平衡方程计算:

$$\text{ET} = \Delta W + P + I - R + G - D \quad (5)$$

式中, ET 为玉米生育期耗水量, mm ; ΔW 为播种期与收获期土壤储水量之差, mm ; P 为生育期有效降水量, mm ; I 为玉米生育期的灌水量, mm ; G 为生育期地下水对作物根系的补给量, mm , 本研究根区范围定义为 0~60 cm 深度^[18], 而试验区地下水埋深距离根层大于 1 m , 故可忽略地下水补给^[19]; R 为生育期地表径流量, mm , 试区地势平坦, 无地表径流产生; D 为生育期根区深层渗漏量, mm , 可以依据 FAO 56 分册中提供的方法计算, 假定降雨或灌溉先补给根系层土壤水分至田间持水量, 多余的水分即为深层渗漏损失量^[20]。

2 结果

2.1 不同滴灌灌水下限对土壤剖面水分分布的影响

2.1.1 土壤剖面水分分布差异 2017 和 2018 年玉米生育期, 膜下滴灌下 0~120 cm 深度土壤剖面内体积含水量分布情况如图 4 所示。以 2017 年为例, 不同时期各处理 0~120 cm 土壤剖面内随着深度的增加, 土壤含水量整体呈现先减小后增大的趋势, 其中 0~40 cm 层土壤含水量普遍小于下层 80~120 cm 层; 受滴灌灌溉和夹砂层的影响, 土壤含水量在剖面内的分布存在突变点, 在拔节期, S2、S3、S4、S5 的含水量剖面分布的突变点出现在 40 cm 深度处 (图 4a), 而在抽雄、灌浆和成熟期时, 该突变点下移至 60 cm 处 (图 4b、图 4c、图 4d), 这种下移可能是受到累积灌水和玉米根系生长的影响, 拔节期时水分供应 (含灌溉和降雨) 较少且根系较浅, 抽雄期后累积灌水增多且作物根系不断生长, 根系吸水增强, 此时 60 cm 处的土壤水分也被根系吸收利用。不同灌水下限处理土壤水分剖面垂直分布特点和随生育期的变化趋势相似, 但数值上差异显著 ($P < 0.05$)。在玉米生育期内, S1 处理土壤含水量明显高于其他处理 (图 4a、图 4b、图 4c), 同生育期内表层土壤含水量 (0~40 cm) 随灌水下限的降低依次减小; 各处理间含水量差异最大的土层为 0~60 cm , 而除 S5 外的处理 80~120 cm 的土层含水量均较高, 且之间的差异较小。

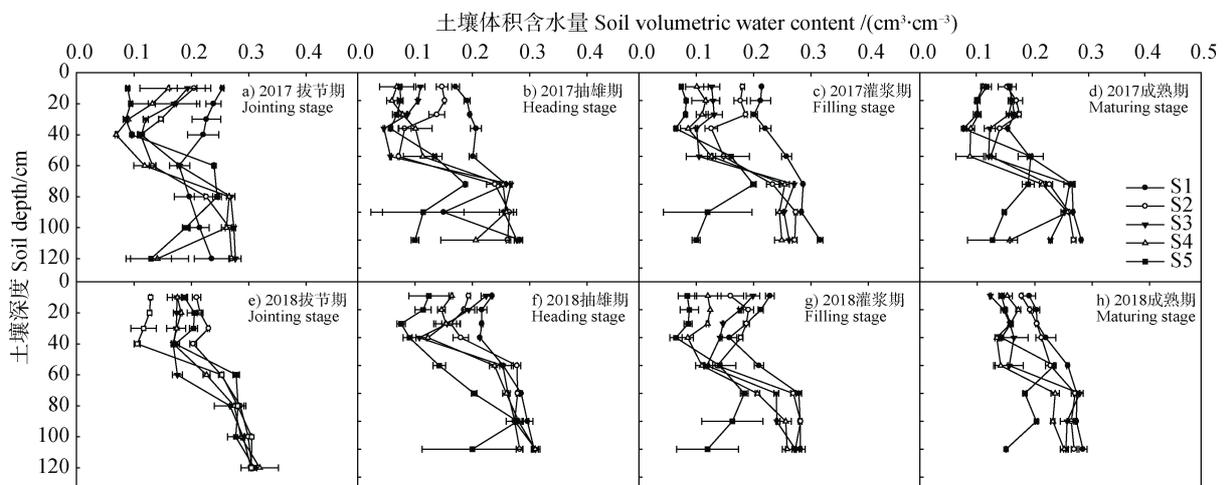


图 4 2017 年、2018 年膜下滴灌春玉米不同生育期土壤剖面含水量

Fig. 4 Volumetric water content in the soil profile at different growing stages of spring maize under mulched drip irrigation in 2017 and 2018

值得注意的是, 灌水下限土壤基质势最高的 S1 整个 0~120 cm 深度土壤剖面内均保持着较高的含水量, 剖面分布无明显突变点。灌水下限最低的 S5 处理 100~120 cm 的土壤含水量显著小于其他处理 ($P<0.05$)。同样情况 S4 处理在拔节期也出现过, 但随着灌溉的进行 S4 处理下这种情况逐渐消失。在较为湿润的 2018 年, 仅有 S5 处理 100~120 cm 土壤含水量明显较小, 这可能是由于灌溉水平越低, 砂质夹层对水分的拦截作用越明显。

2.1.2 不同生育期土壤剖面贮水量 为进一步研究水分在土壤剖面内的分布情况, 本研究根据土壤质地 (表 1) 以及玉米根系分布将 0~120 cm 土壤剖面分为三层, 分别为 0~60 cm 根层, 60~100 cm 的砂层以及 100~120 cm 的深层, 分别根据式 (1) 计算各层贮水量。2017 年和 2018 年春玉米不同生育期土壤剖面贮水量如图 5 所示。以干旱的 2017 年为例, 2017 年生育期内降雨较少, 水分来源主要以灌溉为主。灌水较多的 S1 处理 0~120 cm 土层的贮水量在各生育期始终处于最高水平; 各处理之间 0~60 cm 的根层土壤贮水量差异显著, 而 S1、S2、S3、S4 处理的砂层贮水量差异不显著 ($P>0.05$) (图 5a);

在玉米需水旺盛的抽雄和灌浆期, 除 S1 以外的 S2、S3、S4、S5 根层贮水量远小于砂层贮水量 ($P<0.05$)。此外, S1、S2、S3、S4 处理砂层和深层土壤贮水量在生育期内变化幅度较小, 而 S5 处理的砂层贮水量在生育期内变化较大, 表现为抽雄和灌浆期砂层的贮水量高于拔节期和成熟期, 此时期 100~120 cm 的深层土壤贮水量极低, 这可能是 S5 处理灌水少, 在根系吸水旺盛的时期灌溉水分几乎全部用于根系吸水, 此时蒸发也最为强烈, 深层土壤受到二者的综合影响导致贮水量减小。以上结果表明土壤贮水量主要受到基质势控制水平和蒸腾作用的影响, 灌水下限越高, 灌水越频繁, 可保持在作物根层的水分就越多。整体而言, S1 处理最有利于保持根层土壤水分, 其次为 S2 处理, S3 和 S4 处理在玉米需水旺盛的抽雄和灌浆期之间的差别反而不显著 ($P>0.05$), 而 S5 处理贮水量始终较低 (图 5a)。

此外, 不同生育时期比较发现, 成熟期的土壤贮水量存在略高于或等于灌浆期的情况, 这可能是因为成熟期玉米根系活力逐渐降低, 玉米耗水量减小, 灌溉或降雨供水大于水分消耗, 致使成熟期土壤贮水量仍较高, 这一现象在湿润的 2018 年更加明显 (图 5b)。

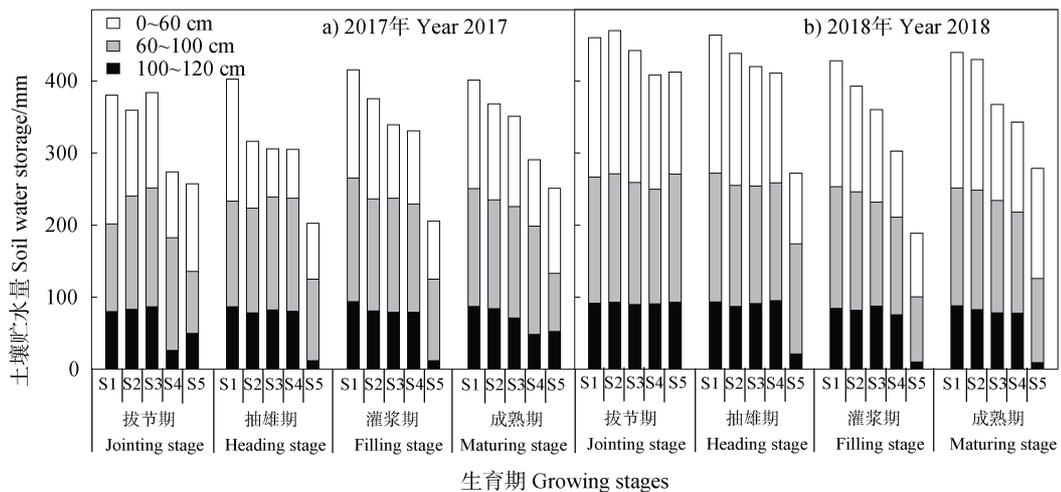


图 5 2017 年、2018 年膜下滴灌春玉米不同生育期土壤剖面贮水量

Fig. 5 Water storage in the soil profile at different growing stages of spring maize under mulched drip irrigation in 2017 and 2018

2.2 不同滴灌灌水下限对土壤剖面盐分分布的影响

2.2.1 土壤剖面盐分分布差异 覆膜可以有效抑制膜下土壤水分蒸发, 在此条件下根系吸水和灌溉是影响土壤盐分的主要因素。而滴灌“少量多次”的灌水特点并不能将盐分淋洗至深层甚至排走, 灌

水过程中, 土壤盐分随着水分的人渗和再分布过程而运移, 上层土壤盐分含量逐渐降低, 而停止灌水后, 随土壤蒸发和根系吸水盐分继续在上层土壤积聚, 直至下次灌溉 (或降雨) 来临, 如此循环直至停止整个生育期内的灌溉。玉米不同生育期各处理

盐剖面分布情况如图 6 所示。以 2017 年为例, 整体来看, 各个处理的 $EC_{1:5}$ 值在表层和砂层较高, 土壤盐分随深度增加的变化规律为先减小后增大, 其中增大的点出现在砂层上边界。S1、S2、S3 处理的 $EC_{1:5}$ 在不同生育期内变化较小, 始终处于相对较低的水平, 而 S5 处理 $EC_{1:5}$ 在不同生育期内的变幅最大。不同灌水下限处理显著影响 0~40 cm 深度表层土壤盐分含量, $EC_{1:5}$ 值之间差异显著 ($P<0.05$), 而深层土壤盐分差异较小(图 6a、图 6b、图 6c、图 6d), 这与水分分布情况类似。从控盐的

角度看, 根区土壤抑盐效果最好的处理是 S1, 这是由于高频灌水和相对较高的灌水量可以带动表层土壤盐分向下方运移, 维持根区“高水低盐”的环境; 表层积盐最严重的是 S5 处理, 在成熟期时盐分也主要集中在 0~60 cm 深度根层土壤中, 这可能是由于 S5 处理灌水量最少, 水分入渗的深度有限, 对盐分的淋洗作用较弱, 加之砂层对水分的拦截作用, 少量被淋洗出根层的盐分也随之留在砂层, 所以 S5 处理 100~120 cm 深层土壤 $EC_{1:5}$ 值在各生育期始终保持在一个较低的水平(图 6)。

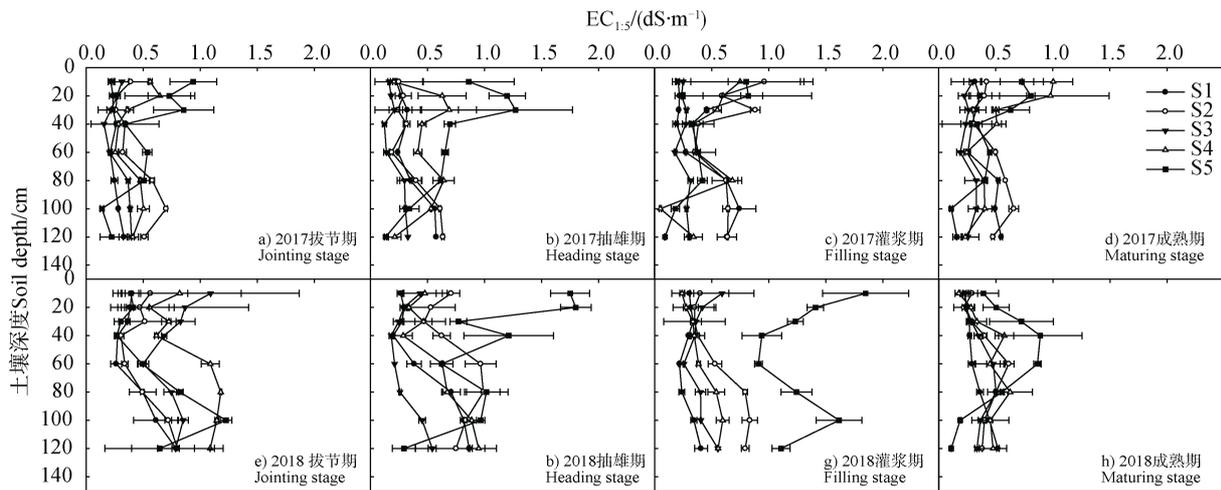


图 6 2017 年、2018 年膜下滴灌春玉米不同生育期土壤剖面盐分 ($EC_{1:5}$) 分布

Fig. 6 Distribution of salinity ($EC_{1:5}$) in the soil profile at different growing stages of spring maize under mulched drip irrigation in 2017 and 2018

2.2.2 不同生育期土壤剖面储盐量 为探究不同处理土壤剖面储盐量的变化情况, 与上文中研究储水量变化时一致, 将土壤剖面分为 0~60 cm、60~100 cm 和 100~120 cm 层, 根据式 (2)、式 (3) 计算各层储盐量。2017 年和 2018 年春玉米不同生育期土壤剖面贮水量如图 7 所示。以 2017 年为例, 土壤盐分的积累情况与灌水下限有极大的相关性。随着灌溉和施肥的进行, 土壤储盐量生育期内整体变化趋势为先增加后减小。这是因为每次灌溉均伴随有肥料的输入, 当停止灌溉时, 玉米尚处于灌浆阶段, 之后的时间里土壤盐分没有输入, 因此成熟期的储盐量较之前阶段稍有下降。从各处理 0~120 cm 的储盐量总量上看, 整个生育期内灌水较多的 S1、S2 处理储盐量变化较小, 灌水最少的 S5 处理变化最大, 而且盐分逐步在上层土壤积累, 这种盐分总量变化应该主要受灌水和玉米生长的影响。

不同处理表层和砂层的盐分积累差异也较大, 其中各处理之间 0~60 cm 的根层土壤储盐量差异最大(图 7a), 具体表现为随着灌水下限的降低, 盐分逐渐在表层土壤积累; S1、S2、S3 处理的土层积盐状况相似, 表现为 0~60 cm 的根层土壤储盐量较少, 主要在 60~100 cm 的砂层积盐; S4、S5 处理的土层积盐状况相似, 主要为 0~60 cm 的表层积盐, 而砂层及深层土壤储盐量较少。此外各处理在成熟期时的土壤盐分含量较拔节期均有不同程度的增加, 这与张伟等^[21]提出的滴灌会导致土壤积盐的结论一致。

2.3 不同灌水下限对春玉米产量和水分利用效率的影响

不同灌溉水平通过影响土壤水盐状况进而影响作物产量和水分利用, 水分利用效率 (WUE) 用以描述植株产量与耗水量之间的关系, 是评价节水措施的一项重要指标^[22-24]。灌水下限显著影响春玉米

产量(图8)。随着灌水下限的降低,春玉米产量逐渐降低,其中S1、S2和S3之间差异不显著,产量在 $16\ 200\sim 15\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,但三者显著高于S4和S5处理($P<0.05$)。随着灌水下限的降低(从S1到S5),春玉米WUE表现为先增加后降低的趋势(图8)。以2017年为例,2017年S1处理WUE为 $37.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,而S5处理WUE为 $38.0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$,两处理的灌水量差异较大,但WUE却相近,说明灌溉水平并不是越高越好,这可

能是因为土壤水分含量过高会导致土壤通气状况较差,玉米生长因此受到限制,而水分过低则不能满足根系需水,进而影响产量形成。2017年和2018年WUE峰值对应的灌水下限均为 $-30\ \text{kPa}$,WUE分别为 $52.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $47.1\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。由于2018年在玉米生育末期降水较多,而此时玉米对水分的需求较小,降雨多用于土壤蒸发,可能在一定程度上掩盖了不同灌水处理之间的差异,所以处理间差异不如2017年明显(图8)。

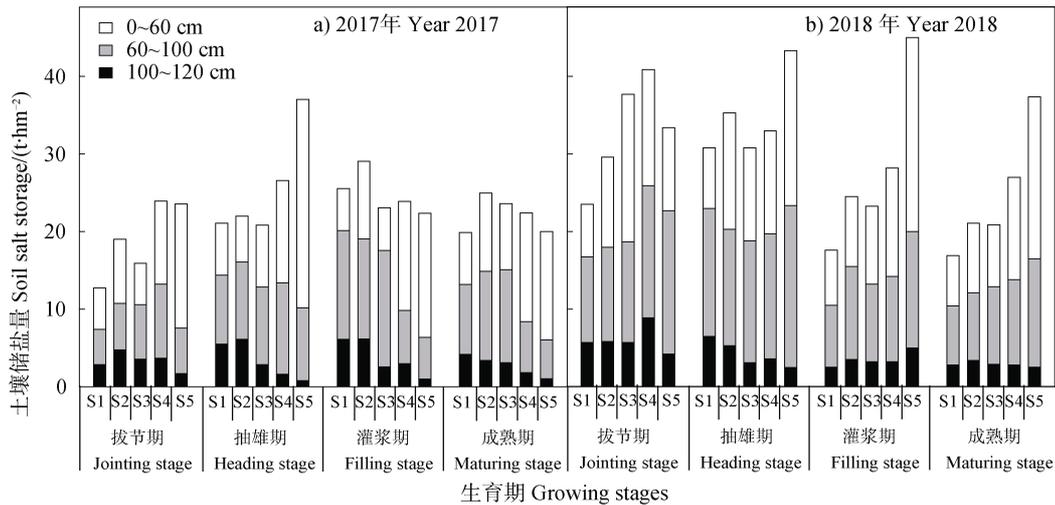
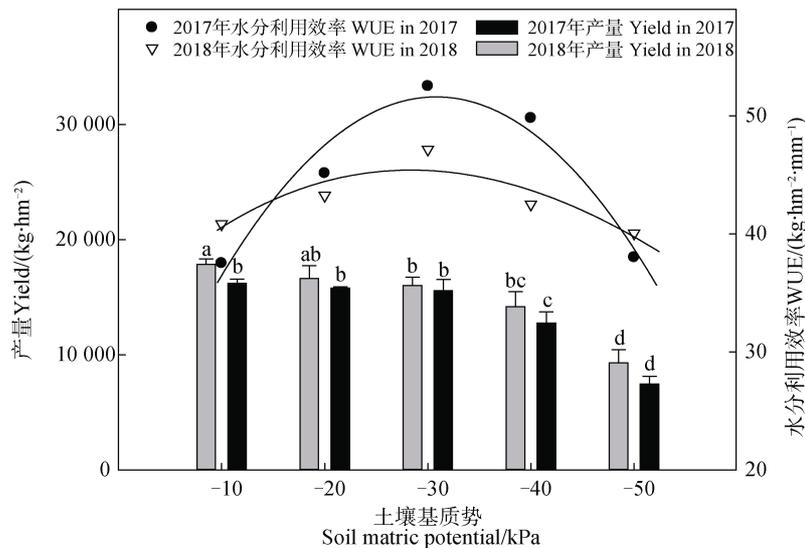


图7 2017年、2018年膜下滴灌春玉米不同生育期土壤剖面储盐量

Fig. 7 Salt storage in the soil profile at different growing stages of spring maize under mulched drip irrigation in 2017 and 2018



注: 不同字母之间表示差异显著 ($P<0.05$)。Note: Values with different letters indicate different significantly ($P<0.05$)

图8 2017年和2018年不同膜下滴灌春玉米籽粒产量与水分利用效率(WUE)

Fig. 8 Grain yield and water use efficiency (WUE) of spring maize under different drip irrigation regimes in 2017 and 2018

3 讨论

根据土壤水动力学,在相同含水量情况下,土壤水吸力随着孔隙度的增大而减小^[25],由于砂土的孔隙度大于壤土的孔隙度,所以在理想状态下,为了维持整个土壤剖面水势的连续性,砂土层的含水量要小于壤土的含水量,但是本研究中则是砂层的土壤含水量高于上层土壤,其原因可能是大田试验的环境较为复杂,除根系吸水对含水量有较大影响之外,孔隙度的突变不仅仅影响到土层含水量和水势还会影响到水力梯度和传导度^[26-27],从而影响水分和溶质穿过不同土层时所需要的时间;此外,高频滴灌不同于传统灌溉,可以为根区持续提供水分,在降低根区水分胁迫上有着无可比拟的优越性,且灌溉的时间间隔较短(S1处理平均2~3d,S5处理间隔最长,为8d),相较于砂层水的缓慢补给,灌溉水可以迅速改善根层土壤水分亏缺的状况。在上述结果中,水分突变点出现在砂层上边界的原因可能是砂土层对水分运动产生影响,使得分层界面处的土壤孔隙和水力学性质出现明显的不连续,从而影响整个农田的含水量分布^[28]。此外,史文娟等^[29]也提出虽然砂层的孔隙大于壤土,饱和导水率高。但在非饱和状态下,砂层土壤水由于毛管力向上移动的过程中,与壤土接触表面的绝大多数空隙中的水会被排空,成为不导水空隙,使导水率变小,水分移动过程变得缓慢。以上结果说明虽然砂层的水分含量多,但是由于滴灌的作用和不导水空隙的影响,水分很难向上进行补给。而且灌水最少的S5处理砂层土壤贮水量在抽雄和灌浆期时远高于下层土壤贮水量,但随着灌溉下限的提高,这个情况逐渐消失,这一点与曲晨晓和王炜^[30]指出的在稳定供水的情况下,土壤剖面中的砂质夹层对上层土壤水分有较长期的保水作用相似。这是因为砂层下边界处的粗—细界面上存在水势差逆向,继而影响层间导水率和入渗能力,对水分的向下移动产生阻碍,可以使砂层获得良好的储水性。

本研究表明,夹砂层的存在显著影响水分在土壤剖面中的入渗和分布,进一步影响植物根系吸水,这与前人研究结果一致^[10]。已有研究指出,当壤土层下垫有砂土层时,其持水量显著高于该土层的最小持水量,壤土层湿润到最小持水量后会得到一定

补充性的水量,形成毛管支持悬着水,上下两土层土壤孔隙大小的差别愈大时,则上层在湿润到最小持水量之后所得到的补充水量也就愈多,从而不影响下部砂土层的持水性能^[31];而这种使水分在上层土中短暂累积的能力对植物蒸腾作用而言意义重大,有利于植物生长,增加产量^[10]。

蒸腾作用(由于覆膜不考虑蒸发)以及灌溉(降雨)水分入渗是影响土壤盐分运移的主要因子。蒸腾作用使下层盐分在根层积累,而灌溉入渗水则可以溶解根区土壤所含有的固态盐分,与原有的土壤溶液混合向下移动,迅速降低根区土壤盐分,以此来达到脱盐的效果,当脱盐达到一定程度后,土壤盐分浓度便会趋于稳定,在有充足灌水的时候,这个作用的效果更加明显;均质土壤湿润锋附近的积盐现象是由于土壤含水率较低、水分运移速度慢,对盐分的携带能力低而导致的^[32];此外,有研究指出,盐分随着水分从渗透性好的土层运移至渗透性弱的土层时会产生明显的滞盐现象^[32],所以当盐分随水分进入砂层之后,由于这种阻滞作用会使盐分在砂土层中大幅增加,这与生育末期砂层含盐量大于上土层含盐量的结果相吻合,其中以S5处理最为明显(图6);此外,根据S1处理的结果分析,在高频灌溉的情况下,盐分随水到达砂层之后,也可使较多盐分滞留于土砂界面以下深层壤土中,同时由于砂层的阻水性,向根区返盐作用较小,这对于作物的生长非常有利。这与地下水浅埋区盐碱地改良过程中常在根层以下铺设砂石滤层以便于淋洗盐分的理念一致^[33],可为盐碱地改良提供一种思路。

综上,砂层的存在可以使玉米生育期根层土壤贮水量得到提高,并且在一定程度上抑制盐分向上迁移,但是考虑到河套灌区传统灌水习惯,在作物收获后一般会利用引黄水进行漫灌(俗称秋浇),而秋浇后的冻融过程中,夹砂层土壤对水分、盐分迁移的影响尚未清楚,还需要在以后的研究中继续探讨。

4 结论

夹砂层的存在显著影响剖面土壤水分入渗和盐分运移规律。膜下滴灌条件下土壤剖面水分垂直分布差异明显,一般上层0~60cm根层土壤含水量较

低, 而 60~100 cm 深度的夹砂层土壤含水量高, 生育期内多维持在田间持水量水平; 而土壤盐分在剖面内的垂直分布受水分运移影响, 更多的盐分聚集在夹砂层; 水分和盐分在剖面内分布规律的突变点均出现在砂层上边界处。不同滴灌灌水下限处理下土壤剖面水盐分分布的差异主要体现在 0~60 cm 深度的根层范围内。灌水下限越高, 根区含水量越高、含盐量越低, 而 60~100 cm 深度的砂层及以下深度土层水分和盐分含量在各处理之间差异不显著。因此, 针对河套灌区类似的夹砂地农田, 如选择膜下滴灌, 应将灌水下限控制为-30 kPa, 每次灌水 10~20 mm, 这样既可以维持根区合适的水盐环境, 又可以获得较高的玉米籽粒产量和水分利用效率。

参考文献 (References)

- [1] Tong W J. Study on salt tolerance of crops and cropping system optimization in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. [童文杰. 河套灌区作物耐盐性评价及种植制度优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.]
- [2] Li Y, Ren X, Robert H. Influence of various soil textures and layer positions on infiltration characteristics of layered soils[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30 (4): 485—490. [李毅, 任鑫, Horton Robert. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30 (4): 485—490.]
- [3] Fan Y W, Huang N, Ma X Y, et al. Simulation of infiltration characteristics in soil with sand interlayer using HYDRUS-1D[J]. Soils, 2016, 48 (1): 193—200. [范严伟, 黄宁, 马孝义, 等. 应用 HYDRUS-1D 模拟砂质夹层土壤入渗特性[J]. 土壤, 2016, 48 (1): 193—200.]
- [4] Ma M M, Lin Q, Xu S H. Water infiltration characteristics of layered soil under influences of different factors and estimation of hydraulic parameters[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (2): 347—358. [马蒙蒙, 林青, 徐绍辉. 不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 347—358.]
- [5] Xiong D H, Liu S X, Mo X G. Numerical difference in soil water between vertically stratified and homogenized soil profiles [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26 (4): 593—603. [熊丁晖, 刘苏峡, 莫兴国. 土壤垂直向分层和均匀处理下水分差异的数值探讨[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (4): 593—603.]
- [6] Miller D E, Gardner W H. Water infiltration into stratified soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962, 26 (2): 115—119.
- [7] Hill D E, Parlange J Y. Wetting front instability in layered soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1972, 36 (5): 697—702.
- [8] Ren L D, Huang M B, Fan J. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (19): 105—111. [任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (19): 105—111.]
- [9] Lin Q, Xu S H. Parameter identification and uncertainty analysis of soil water movement model in field layered soils based on Bayes Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (4): 428—438. [林青, 徐绍辉. 基于 Bayes 理论的田间层状土壤水分运动参数识别及不确定性分析[J]. 水利学报, 2018, 49 (4): 428—438.]
- [10] Hu X Y. Study on effectiveness of stratified soil moisture on plants[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2019, 65 (3): 62—66. [胡心悦. 层状土壤水分对植物有效性研究[J]. 陕西农业科学, 2019, 65 (3): 62—66.]
- [11] Zhao Z C, Yang X H, Li Q M, et al. Effects of different drip irrigation methods under plastic film on physiological characteristics and water use efficiency of protected cucumber[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (22): 6597—6605. [赵志成, 杨显贺, 李清明, 等. 不同膜下滴灌方式对设施黄瓜生理特性及水分利用效率的影响[J]. 生态学报, 2014, 34 (22): 6597—6605.]
- [12] Ji X X, Xu F, Liu M H, et al. Investigation on growth and water use of spring maize under mulched drip irrigation based on soil matric potential[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (11): 230—239. [姬祥祥, 徐芳, 刘美含, 等. 土壤水基质势膜下滴灌春玉米生长和耗水特性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49 (11): 230—239.]
- [13] Fan Y J, Lü Z Y, Tian D L, et al. Irrigation regime for corn production with drip irrigation and plastic mulching in Hetao irrigation region [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33 (1): 123—129. [范雅君, 吕志远, 田德龙, 等. 河套灌区玉米膜下滴灌灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33 (1): 123—129.]
- [14] Liu H J, Wang X M, Zhang X, et al. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao irrigation District of China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 144—157.
- [15] Du B, Qu Z Y, Yu J, et al. Experimental study on crop coefficient under mulched drip irrigation in Hetao irrigation district of Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33 (Z1): 16—20. [杜斌, 屈忠义, 于健, 等. 内蒙古河套灌区大田作物膜下

- 滴灌作物系数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33 (Z1): 16—20.]
- [16] Li X Y, Shi H B, Gong X W, et al. Root distribution in strip intercropping field under different growth period and different soil water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45 (3): 140—147. [李仙岳, 史海滨, 龚雪文, 等. 立体种植农田不同生育期及土壤水分的根系分布特征[J]. 农业机械学报, 2014, 45 (3): 140—147.]
- [17] 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.
- [18] Zhou L F, Feng H. Plastic film mulching stimulates brace root emergence and soil nutrient absorption of maize in an arid environment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100 (2): 540—550.
- [19] Shi W J, Wang Z R, Shen B, et al. Soil capillary water upward movement from sand layered soil column[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18 (6): 167—170. [史文娟, 汪志荣, 沈冰, 等. 夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (6): 167—170.]
- [20] Chivenge P P, Murwira H K, Giller K E, et al. Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94 (2): 328—337.
- [21] Zhang W, Lü 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. [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.]
- [22] Peng S Z, Zhu C L. Study on the water requirement rules of crops under water saving irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2003 (2): 5—8, 46. [彭世彰, 朱成立. 作物节水灌溉需水规律研究[J]. 节水灌溉, 2003 (2): 5—8, 46.]
- [23] Li R S, Xu H C, Yin G T, et al. Advances in the water use efficiency of plant[J]. Forest Research, 2003, 16 (3): 366—371. [李荣生, 许焯灿, 尹光天, 等. 植物水分利用效率的研究进展[J]. 林业科学研究, 2003, 16 (3): 366—371.]
- [24] Feng H, Liu X Q, Zuo Y Q, et al. Effect of gravel mulching degree on farmland moisture and water consumption features of crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (5): 155—163. [冯浩, 刘晓青, 左亿球, 等. 砾石覆盖量对农田水分与作物耗水特征的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47 (5): 155—163.]
- [25] Lei Z D, Yang S X, Xie S C. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988, 86—88. [雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988, 86—88.]
- [26] Feng Y J, Chen W F, Zhang L N, et al. Experimental study on salt and water movement of seashore saline soil in laboratory and harnessing measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16 (3): 38—42. [冯永军, 陈为峰, 张蕾娜, 等. 滨海盐渍土水盐运动室内实验研究及治理对策[J]. 农业工程学报, 2000, 16 (3): 38—42.]
- [27] Luo J X. Amelioration of saline-alkali soil in Xinjiang irrigation district[M]. Beijing: Press of Water Conservancy and Electric Power, 1985. [罗家雄. 新疆垦区盐碱地改良[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985, 80.]
- [28] Li X P, Chang 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): 41—50.
- [29] Shi W J, Shen B, Wang Z R, et al. Water and salt transport in sand-layered soil under evaporation with the shallow under ground water table[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21 (9): 23—26. [史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21 (9): 23—26.]
- [30] Qu C X, Wang W. Mechanisms of water reserved by sand interlayer in soil profile[J]. Journal Huazhong: Central China Agricultural University, 1997, 16 (5): 349—356. [曲晨晓, 王炜. 土壤剖面中砂质夹层的储水作用及机理研究[J]. 华中农业大学学报, 1997, 16 (5): 349—356.]
- [31] Cao R X, Shao M A, Jia X X. Experimental study on effects of layered soils on saturated hydraulic conductivity [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2015, 29 (3): 18—21. [曹瑞雪, 邵明安, 贾小旭. 层状土壤饱和导水率影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29 (3): 18—21.]
- [32] 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. [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.]
- [33] Sun J X, Kang Y H, Wan S Q. Effects of an imbedded gravel-sand layer on reclamation of coastal saline soils under drip irrigation and on plant growth[J]. Agricultural Water Management, 2013, 123: 12—19.

(责任编辑: 檀满枝)