

滴头流量对压砂土壤水盐分布及西瓜生长、产量的影响

杨宗凯¹, 谭军利^{1,2,3*}, 王西娜⁴, 马瑞⁴

(1.宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2.宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021; 3.旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021; 4.宁夏大学 农学院, 银川 750021)

摘要:【目的】探明微咸水灌溉条件下滴头流量对压砂地土壤水盐分布及西瓜生长和产量的影响。【方法】通过田间试验, 设置 Q1 (2 L/h)、Q2 (3 L/h)、Q3 (4 L/h) 3 种滴头流量, 研究滴头流量对灌水前后土壤水盐分布特征、西瓜生长、产量、果实品质及水分利用效率的影响。【结果】滴头流量越大, 土壤水平湿润范围越大, 膜间土壤含水率越高, 滴头下方垂直湿润深度越浅。各处理 0~100 cm 土壤盐分经过一个全生育期均呈下降趋势, 盐分减少量随滴头流量增大而增加。果实可溶性糖量随滴头流量增大呈先增大后减小趋势, Q2 处理最大, 分别较 Q1、Q3 处理提高了 54.3%和 22.3%; 维生素 C 量随滴头流量增加呈先减少后增加趋势, Q3 处理最高, 较 Q2 处理提高了 53.7%。西瓜产量与灌溉水利用效率均随滴头流量增大而增加, Q3 处理产量分别较 Q1、Q2 处理提高了 6.20%和 3.56%, Q3 处理的灌溉水利用效率分别较 Q1、Q2 处理提高了 6.49%和 3.72%。【结论】综合考虑土壤水盐再分布形式与西瓜产量、品质, 适用于压砂地西瓜微咸水滴灌流量为 Q3 (4 L/h)。

关键词: 滴灌; 滴头流量; 压砂地; 微咸水; 水盐分布; 西瓜

中图分类号: S257.6; S651

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022324

OSID: 

杨宗凯, 谭军利, 王西娜, 等. 滴头流量对压砂土壤水盐分布及西瓜生长、产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 30-37.

YANG Zongkai, TAN Junli, WANG Xi'na, et al. Effect of Dripping Rate on Soil Water and Salt Redistribution and Growth and Yield of Watermelon in Gravel-mulched Field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 30-37.

0 引言

【研究意义】宁夏中卫香山地区处于干旱半干旱地带, 农业水资源相对紧缺^[1-2], 当地采用微咸水滴灌与压砂覆膜相结合的种植方式应对水资源匮乏状况, 该模式比其他种植技术能有效降低作物棵间蒸发, 影响土壤水热运移^[3], 对土壤表层进行覆盖处理, 可弱化土壤盐渍化危害, 改善作物根系生长环境^[4-6]。当地瓜农利用滴灌种植西瓜, 但缺乏合理的滴灌参数指导。调节灌水量、滴头流量与滴头间距等滴灌参数, 可影响土壤水盐分布与作物产量^[7]。压砂地表面的砂砾层渗透性强, 土壤层渗透性相对较弱, 滴头流量作为滴灌技术重要参数之一, 通过调节滴头流量来改善压砂地土壤水盐分布, 对当地西瓜种植与水资源高效利用有重要意义。【研究进展】砂砾覆盖可有效改变水分入渗阶段土壤优质流与基质流配比^[8], 蒸发时期水分

阶段化运动规律同样受覆砂影响^[9-10], 蒸发与入渗阶段水分运动导致土壤盐分运动与分布形式发生改变^[11]。覆砂对土壤水盐的调控效果, 直接作用于压砂瓜的耗水量及产量^[12]。滴头流量作为田间滴灌的基本参数, 对调控土壤水盐运移有重要作用^[13]。湿润体垂向距离随滴头流量的增大而减小, 水平湿润距离则随滴头流量增大而增大^[14]。土壤脱盐区的形成与湿润体的形状有密切关系, 适当的滴头流量可促使适合作物生长的湿润体与脱盐区形成, 对作物生长有一定的促进作用^[15-18], 可有效提高作物产量^[18-21]。【切入点】覆砂与适宜的滴头流量可以改变土壤的水盐分布特征为作物的生长提供良好的水盐环境, 但滴头流量对压砂地土壤水盐分布影响的研究相对较少, 滴头流量与压砂西瓜产量的关系并不明确, 选择适宜的滴头流量是压砂地西瓜产业急需解决的关键问题。【拟解决问题】为此, 通过田间试验比较不同滴头流量对土壤水盐分特征、西瓜生长及产量和品质的影响, 为压砂地微咸水合理利用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 4—8 月在宁夏中卫市沙坡头区香

收稿日期: 2022-06-14

基金项目: 宁夏自然科学基金项目 (2022AAC02013, 2020AAC03090); 国家自然科学基金项目 (31860590); 宁夏高等学校一流学科建设 (水利工程) 项目 (NXYLXK2021A03)

作者简介: 杨宗凯 (1992-), 男, 河南登封人。硕士研究生, 主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail: 1269764230@qq.com

通信作者: 谭军利 (1979-), 男, 湖南茶陵人。教授, 博士, 主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail: tanjl@nxu.edu.cn

山乡红圈子村进行，该区域温差大，气候干燥，年降水量 220~240 mm，蒸发量为 2 200~2 500 mm，年蒸发量是年降水量的 9~10 倍。年内降水不均，主要集中在 6—7 月，西瓜生育期降水量 81.6 mm，日降水量分布如图 1 所示。

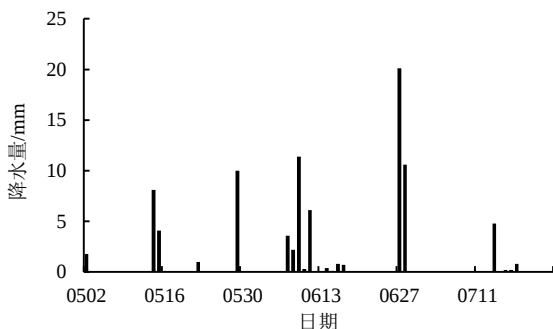


图 1 西瓜生育期内降水量

Fig.1 Rainfall distribution during watermelon growth period

表 2 灌溉水盐分及离子组成

Table 2 Salinity and ionic composition of irrigation water

pH 值	EC 值/(mS cm ⁻¹)	Ca ²⁺ /(g L ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ /(g L ⁻¹)	Mg ²⁺ /(g L ⁻¹)	K ⁺ /(g L ⁻¹)	Na ⁺ /(g L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ /(g L ⁻¹)	Cl ⁻ /(g L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(g L ⁻¹)
7.96	5.18	0.15	0.01	0.26	0.01	0.21	0.05	1.15	0.11

1.2 试验设计

试验在田间进行，铺设贴片式滴灌管，滴头间距为 15 cm，管上覆宽度为 1 m 塑料薄膜。试验设 3 种滴头流量，分别为 Q1（2 L/h）、Q2（3 L/h）、Q3（4 L/h），为 3 个处理，每个处理 1 个首部，安装压力表，监测滴灌管工作压力，由首部阀门调节压力。3 个处理全生育期灌水 9 次，每次灌水量 90 m³/hm²，全生育期共灌水 810 m³/hm²，灌水量参考试验田附近农户经验灌水量，由水表控制。灌溉频率参考不同生育期灌水量与灌溉定额的最适比例设定，幼苗期灌水 1 次，伸蔓期灌水 2 次（每次间隔 7 d），坐果期灌水 1 次，膨瓜期灌水 5 次（每次间隔 7 d）。每个首部后接 5 条滴灌管，对应 5 行，中间 3 行为 3 个重复，两边各 1 行为保护行，避免试验区被其他处理干扰。西瓜株行距为 1.2 m×1.7 m，每个小区共 30 株西瓜。

1.3 样品采集及测定方法

1.3.1 土壤指标

在水平距离滴灌带 0、15、30、45、60、75、90、105、120 cm 处，垂直向下每 20 cm 取 1 次土，取至 100 cm，植株行距为 120 cm。取样时间为播前取 1 次，6 月 30 日灌水前取 1 次，7 月 10 日取 1 次为灌水后土样（当地农民灌水周期为 2 周 1 次，且 10 d 内无降水干扰），西瓜成熟后取 1 次。用烘干法测量土壤含水率。将土样风干碾碎过 1 mm 筛，将土样配置土水质量比 1：5 的溶液，用雷磁 DDS-307A 电导率仪测量电导率。

试验地 0~100 cm 土层土壤理化性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

土层深度/cm	pH 值	EC 值/ (μS cm ⁻¹)	土壤体积 质量/ (g cm ⁻³)	有机 质量/ (g kg ⁻¹)	田间 持水率/%
0~20	8.38	619.37	1.65	7.47	21.14
20~40	8.40	809.43	1.62	8.31	24.28
40~60	8.37	825.18	1.51	8.17	24.00
60~80	8.44	1 038.91	1.50	7.23	25.23
80~100	8.22	873.09	1.55	4.65	29.38

当地灌溉采用地下微咸水，地下水埋深在 200~260 m 范围内，近年来呈下降趋势。地下水盐分及离子成分如表 2 所示。

1.3.2 西瓜生长指标

在西瓜伸蔓期、开花期、坐果期、成熟期，每个小区选取 5 株瓜，用卷尺测量主蔓长，游标卡尺测量植株茎粗。

1.3.3 西瓜品质及产量

西瓜成熟后，每个小区选取 10 个瓜作为样本，测量各项指标。用百分位电子秤称量单瓜质量(kg)；纵切，用卷尺测量西瓜横径与纵径（cm）；用硬度计测量瓜皮硬度与果肉硬度（kPa）。用数显折射仪测量可溶性固形物（%）；用 NaOH 滴定法测定总酸（%）；用蒽酮比色法测定可溶性糖（g/kg）；用钼蓝比色法测定维生素 C（mg/kg）。

1.3.4 灌溉水分利用效率

灌溉水分利用效率计算式^[22]为：

$$iWUE=Y/Ir, \quad (1)$$

式中：iWUE 为灌溉水分利用效率（kg/m³）；Y 为西瓜果实产量（kg/hm²）；Ir 为灌溉定额（m³/hm²）。

1.3.5 数据处理

采用 SPSS Statistics 25 处理试验数据，采用 LSD 法进行差异显著性检验，采用 Origin2018 作图。

2 结果与分析

2.1 滴头流量对灌水前后土壤水分分布的影响

6 月 30 日灌水前土壤质量含水率分布情况如图 2 所示。灌水前各处理水分分布形式无明显规律，这可能与取样前的多次降水有关；土壤质量含水率从地表到深层呈先增大后减小的分布特征，在心土层

(40~60 cm) 土壤质量含水率达到最高。7 月 10 日灌水后在水平尺度上, 各处理土壤质量含水率从膜内到膜间呈下降趋势, 在膜间土壤含水率最低, 受大气条件影响, 该区域部分水分补给土壤蒸发, 土壤质量含水率降低; 垂直方向, 土壤质量含水率随土层深度增加呈先增大后减小趋势, 心土层土壤质量含水率较高, 与播前相似。

滴头流量对土壤剖面水分分布有显著影响。Q1 处理下土壤水分主要集中在膜内心土层, 膜间土壤质

量含水率下降, 若以含水率为 12% 的等值线所包围的区域为低含水区, 则膜间低含水率区域深度达到 25 cm。Q2 处理下水分集中在心土层, 该土层膜内蓄水量稍高于膜间, 低含水率最深达 10 cm。Q3 处理水分同样聚集在心土层, 该土层膜间土壤质量含水率较高, 膜间低含水率区域深度为 5 cm, 并且在表土层 (0~40 cm) 以滴头为中心形成半径为 20~40 cm 的类圆形含水率较低区域。综上可知, 滴头流量越大, 水平湿润范围越大, 膜间土壤质量含水率越高。

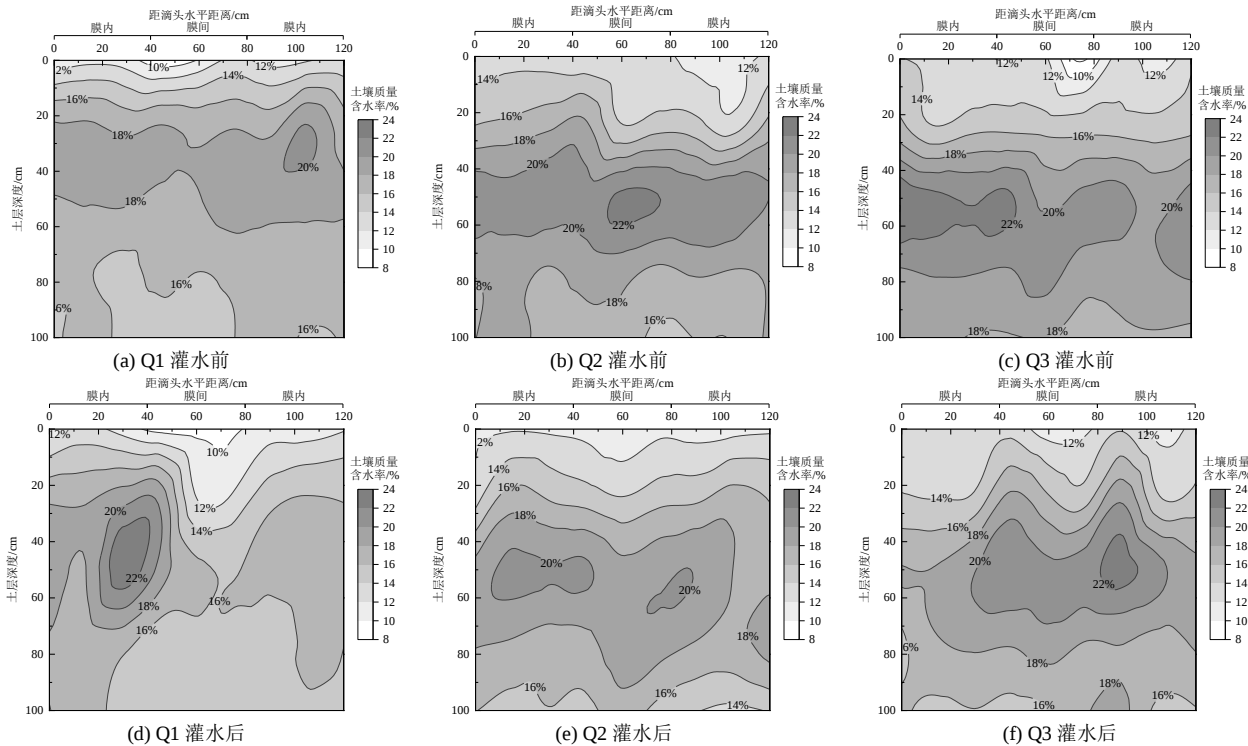


图2 灌水前后各处理土壤含水率分布

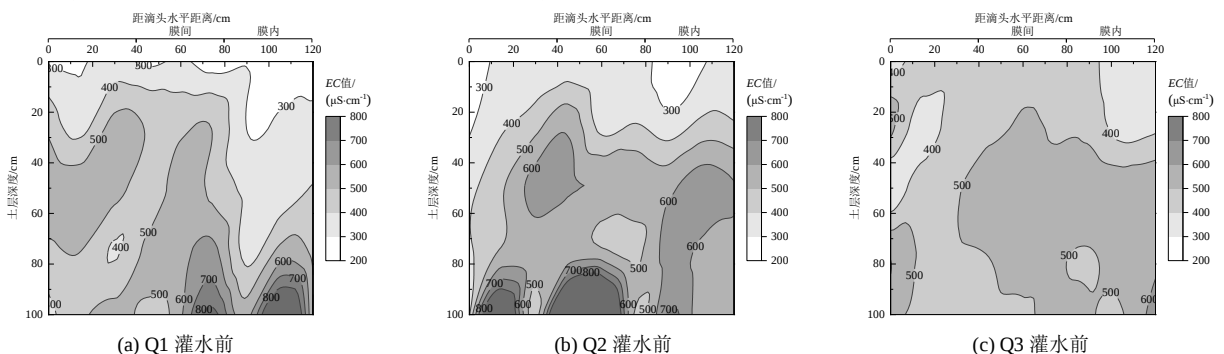
Fig.2 Distribution of soil moisture content before and after irrigation

2.2 滴头流量对土壤盐分的影响

6 月 30 日灌水前土壤电导率分布见图 3, Q1、Q2 处理土壤电导率在底土层 (60~100 cm) 较大, Q3 处理电导率较为均匀, 无积盐区。空间尺度上各处理土壤电导率差异性较大, 无明显规律, 这是由灌水前试验区多次降水导致。

7 月 10 日灌水后各处理土壤电导率分布形式见图 3。若以 $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ 等值线包围的区域为脱盐区域, 以 $800 \mu\text{S}/\text{cm}$ 等值线包围的区域为积盐区域, Q1 处理小区灌水后, 滴头下方脱盐区深度达 90 cm, 水平

脱盐范围约 30 cm; 表土层脱盐区域较小, 膜间表土层均未达到脱盐标准; 膜间心土层出现积盐区; 底土层电导率较灌水前下降, 以上说明该处理盐分发生横向移。Q2 处理在滴头下方脱盐深度为 40~50 cm, 水平范围较大; 表层土脱盐区域较大, 心土层土壤电导率较灌水前有所增加, 底土层电导率下降, 说明该处理土壤盐分上移, 上移效果较 Q1 处理差, 未出现积盐区。Q3 处理脱盐深度为 30~40 cm, 表土层完全脱盐, 40~80 cm 脱盐效果不明显, 在 80~100 cm 层部分区域大量积盐。



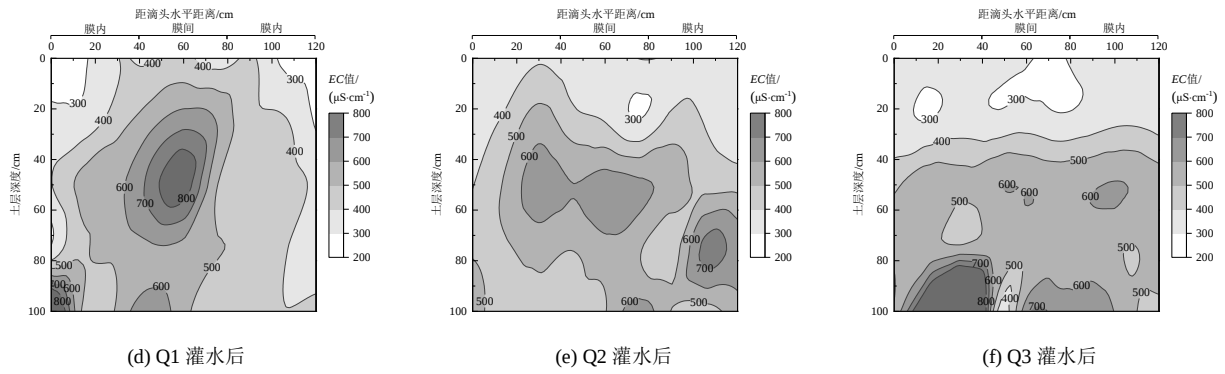


图 3 灌水前后各处理电导率分布

Fig.3 Conductivity distribution of each treatment before and after irrigation

灌水后滴头下方土壤脱盐深度表现为 Q1 处理>Q2 处理>Q3 处理,说明滴头流量越大,脱盐区域越浅。表土层脱盐效果为 Q3 处理>Q2 处理>Q1 处理,说明滴头流量越大,土壤水平脱盐范围越广。随着滴头流量的增大,土壤水平脱盐范围增大,垂直脱盐深度减小。

将盐分变化量定义为收获期与播前土壤平均电导率之差,盐分变化率为盐分变化量与初始电导率比值。收获期 Q3 处理盐分减少最多;心土层 Q1、Q2 处理盐分减少较多,约为 26%;Q2、Q3 处理底土层脱盐效果优于 Q1 处理。土壤剖面盐分平均变化率均为负值,说明各处理土壤均为脱盐状态,且脱盐效果随滴头流量增大而提高。

表 3 为播前与收获期不同土层深度土壤电导率,

表 3 播前、收获期各处理不同土层平均电导率

Table 3 Average conductivity of different soil layers before sowing and during harvest

μS/cm

土层深度/cm	播前			收获期			土壤盐分变化率		
	Q1 处理	Q2 处理	Q3 处理	Q1 处理	Q2 处理	Q3 处理	Q1 处理	Q2 处理	Q3 处理
0~20	568±31	659±22	631±35	384±27	396±39	389±18	-32±5	-40±7	-38±5
20~40	850±46	712±41	866±37	598±45	516±59	465±22	-30±3	-28±4	-46±7
40~60	870±28	833±16	772±57	730±57	617±33	572±47	-16±4	-26±3	-26±6
60~80	1 146±49	1 004±86	966±68	640±24	553±36	552±29	-44±7	-45±3	-43±7
80~100	740±77	929±39	950±62	679±64	560±42	547±59	-27±6	-40±6	-42±6

收获期土壤电导率分布如图 4 所示, Q1 处理在 0~5 cm 土层深度形成较小脱盐区,在膜间 20 cm 以下土层大量积盐;Q2 处理在膜间 0~20 cm 形成脱盐区,底土层发生小范围积盐,40~80 cm 土层深度存在较大的电导率大于 600 μS/cm 区域;Q3 处理膜内、

膜间均存在脱盐区,深度约 20 cm,心土层和底土层盐分也相对较低。随着滴头流量增加,高盐区面积越来越小,位置逐渐下移,说明此次试验中大滴头流量可有效改善土壤盐分累积。

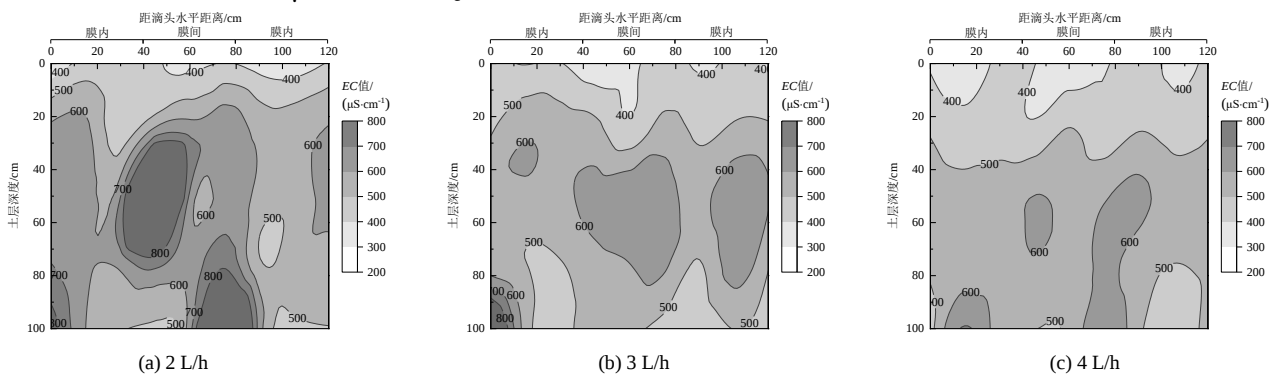


图 4 收获期各处理电导率分布

Fig.4 Conductivity distribution of each treatment during harvest

2.3 滴头流量对西瓜生长的影响

西瓜各生育期主蔓长如图 5 所示, Q2 处理主蔓长在伸蔓期比 Q1、Q3 处理长 10~20 cm,原因可能是植株生长初期根系分布较浅,对盐分胁迫敏感, Q1

处理水平方向盐分淋洗效果最差, Q3 处理垂直方向盐分淋洗效果最差, Q2 处理脱盐区对西瓜苗期生长更为合理。伸蔓期一开花期,各处理主蔓增长量为 132~134 cm,增长量无明显差异。从开花期开始,作

物从营养生长转变为生殖生长,主蔓生长减缓,各处理增长量在 20 cm 左右。坐果期一成熟期, Q1、Q2 处理增长量大约在 24 cm, Q3 处理增长 37 cm, 生长速度大于其他处理。最终主蔓长度均在 310~320 cm, 各处理无明显差异。表明西瓜主蔓增长在各生育期滴对滴头流量响应不同,伸蔓期与成熟期对滴头流量较为敏感,其他生育期受滴头流量影响较小。

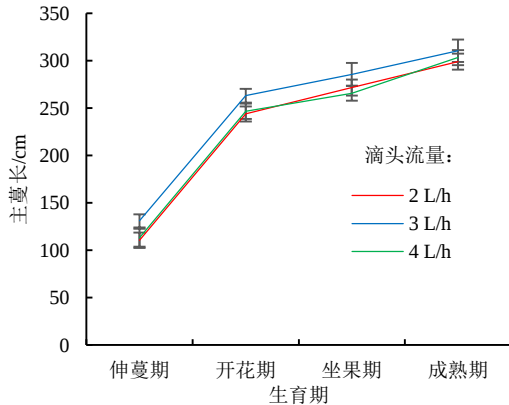


图 5 不同生育期植株的主蔓长

Fig.5 Main vine length of plants at different growth stages

如图 6 所示,在整个西瓜生育期中, Q3 处理茎粗显著大于 Q1、Q2 处理。伸蔓期 3 个处理茎粗较前期依次增加了 26.1%、30.5%、35.0%, Q3 处理增速最明显。茎粗在开花期以后增长缓慢,其原因与主蔓

长从开花期生长减缓原因相同,西瓜从营养生长阶段转变为生殖生长阶段。总的来说, Q3 处理能更好的促进植株茎粗增长。

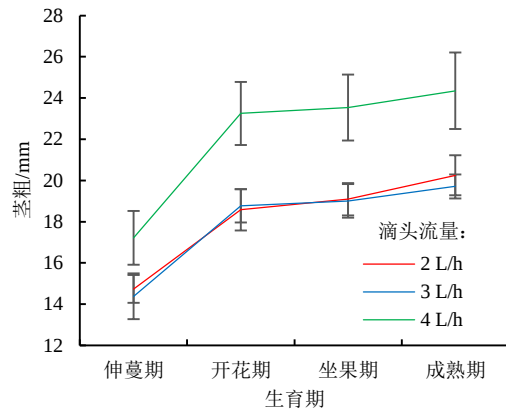


图 6 不同生育期植株的茎粗

Fig.6 Stem diameter of plants at different growth stages

2.4 滴头流量对西瓜产量及品质指标影响

由表 4 可知,不同滴头流量西瓜的横径均达到了 23 cm,瓜皮硬度在 86~89 kPa 之间,果肉硬度在 1~2 kPa 之间,各处理之间无明显差异。Q3 处理纵径优于 Q1、Q2 处理。西瓜纵径与横径的比值定义为果形指数,是果实品质外观的重要指标,果实形态指数为 Q3 处理最大,果型相对较好。综上, Q3 处理更有利于西瓜果实形态发育。

表 4 不同滴头流量对西瓜形态指数影响

Table 4 Effects of different dripper flow on morphological index of watermelon

处理	横径/cm	纵径/cm	瓜皮硬度/kPa	果肉硬度/kPa	果形指数
Q1	23.05±0.35a	32.20±1.60b	88.54±1.58a	1.60±0.11a	1.41±0.03ab
Q2	24.63±2.15a	32.27±0.57b	86.68±4.45a	1.91±0.29a	1.32±0.11b
Q3	23.00±0.60a	35.35±0.45a	88.04±6.43a	1.47±0.40a	1.54±0.02a

注 同一列不同字母表示在 0.05 水平有显著差异。下同。

由表 5 可知,不同滴头流量处理下的瓜心可溶性固形物均在 11%水平以上,瓜周的在 9.5%以上,总酸量都在 7%~9%之间,各处理间并无显著差异。不同滴头流量对总酸量、瓜心和瓜周的可溶性固形物量影响并不明显。维生素 C 量最高的是 Q3 处理,

较 Q1、Q2 处理的维生素量分别提高了 14.8%和 53.7%。可溶性糖量最高的是 Q2 处理达 75.04 g/kg,与 Q1、Q3 处理相比,可溶性糖量分别提高了 54.3%、22.3%。因此, Q2 处理口感更好, Q3 处理维生素 C 量最高。

表 5 不同滴头流量处理对西瓜品质的影响

Table 5 Effects of different dripper flow treatments on watermelon quality

处理	瓜心可溶性固形物/%	瓜周可溶性固形物/%	总酸/%	VC/(mg kg ⁻¹)	可溶性糖/(g kg ⁻¹)
Q1	11.75±0.05a	9.65±0.15a	0.08±0.01a	34.79±2.25a	48.64±2.60c
Q2	11.57±0.67a	9.90±0.35a	0.07±0.01a	25.98±2.99b	75.04±5.70a
Q3	11.80±0.02a	9.55±0.35a	0.09±0.01a	39.93±1.91a	61.35±2.53b

由表 6 可知,西瓜产量随滴头流量增加而增大。试验中所有处理灌水定额及灌水周期一致,所以灌溉水分利用效率与产量呈相同规律。本试验中,增大滴头流量,有利于提高产量与灌溉水分利用效率。

表 6 不同滴头流量处理对西瓜产量及灌溉水分利用效率的影响

Table 6 Effects of different dripper flow treatments on watermelon yield and irrigation water use efficiency

处理	单瓜质量/kg	产量/(t hm ⁻²)	灌溉水分利用效率/(kg m ⁻³)
Q1	10.46±0.20b	41.10±0.75b	50.67±0.97b
Q2	10.74±0.63ab	42.15±2.40ab	52.02±3.05ab
Q3	11.14±0.68a	43.65±2.70a	53.96±3.23a

3 讨论

土壤覆砂影响土壤蒸发与入渗。砂层水分传输能力较弱, 土壤层水分只能以水蒸气形式向上扩散, 灌水后土壤含水率较高, 但受砂层水分运输能力限制, 土层水分不易到达砂层表面补给蒸发量^[23], 限制土壤蒸发中的快速失水阶段^[10], 蒸发损失较小, 水分可有效进入覆砂土壤中。入渗过程中, 砂层大孔隙具备储水能力, 导致水分发生一定横向运移^[24], 横向运移后因大孔隙导流作用水分垂直入渗^[25], 到达土层对土壤进行湿润, 影响土壤受水方式^[26]。本试验水盐分布特征受压砂与滴灌共同影响。

水分再分布发生在灌水后 12 h 内^[27], 滴头流量在该时间段内显著影响土壤水分分布^[28], 覆砂与覆膜结合条件下随滴头流量的增加, 湿润区水平距离增大, 垂直深度减小, 这与前人^[24]研究结论相似。本试验水分运动规律与谭军利等^[26]研究结果不同, 原因可能是砂层砂砾级配导致的孔隙大小不同, 孔隙大小决定砂层饱和导水率^[26-27], 滴头流量与砂层饱和导水率的关系决定了水分运动形式。本次试验灌水后取样时间距灌水前较久, 该时间段内土壤水运动受自然驱动力影响大, 水分分布形式仍存在一定的差异性, 说明滴头流量对覆砂土壤水分分布影响较为长久, 对改善作物水分环境有较大可行性。

流量较小的 Q1 处理滴头下方垂直脱盐深度较大, 膜间脱盐效果较差甚至出现返盐现象, 流量较大的 Q3 处理脱盐区宽浅, 表土层以下盐分累积, 这与人^[29]研究规律相符。收获期土壤盐分均有下降, 这可能是因为西瓜生育期降水较多所致, 灌溉属补灌性质。说明对滴头流量调节, 与降水结合, 可影响土壤盐分分布形式。

李德智等^[30]研究表明, 滴头流量的改变对作物耗水规律造成影响, 合适的滴头流量决定土壤的湿润区与脱盐区形状, 影响植物根系发育, 改善根系吸水效果, 促进作物生长发育。本研究中最适合西瓜生长的滴头流量是 4 L/h, 此时根系吸水量最大, 灌水后滴头附近形成面积较大类圆形土壤含水率较低区域。

本试验将滴头流量设置为单一因素, 控制的则是土壤下湿润区与脱盐区形状, 灌水定额大小影响土壤湿润区大小^[31], 湿润区与脱盐区综合可影响植物根系发育吸水, 本次试验灌水定额较小, 微咸水滴灌条件下较小的灌水定额会导致盐分在土壤表层聚集^[32], 后续试验可将灌水定额纳入试验因素, 以求得最适合当地西瓜种植的灌水定额与滴头流量组合。

4 结论

1) 随着滴头流量增大, 水平湿润距离增加, 压砂地微咸水滴灌膜间 0~60 cm 土层土壤含水率越高。

2) 脱盐区形状随滴头流量增加, 从“窄、深”向“宽、浅”发展。研究区土壤剖面土壤总含盐量随滴头流量增大而减小。

3) 本试验中滴头流量为 4 L/h 处理的西瓜果实品质表现较好, 果形指数、维生素 C、可溶性糖量较高, 该灌溉定额条件下产量与灌溉水利用效率随滴头流量增加而提高, 4 L/h 处理的产量与灌溉水利用效率处于较高水平。

参考文献:

- [1] 赵小勇. 宁夏压砂地生产潜力评价及空间决策系统研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2015.
- [2] 李文明, 吕建国. 苦咸水淡化技术现状及展望[J]. 甘肃科技, 2012, 28(17): 76-80.
- [3] 虎军宏. 压砂地滴灌对土壤水热运移影响的模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [4] MULUMBA L N, LAL R. Mulching effects on selected soil physical properties[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 106-111.
- [5] WANG J, GHIMIRE R, FU X, et al. Straw mulching increases precipitation storage rather than water use efficiency and dryland winter wheat yield[J]. Agricultural Water Management, 2018, 206: 95-101.
- [6] RAHMA A E, WANG W, TANG Z J, et al. Straw mulch can induce greater soil losses from loess slopes than no mulch under extreme rainfall conditions[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232: 141-151.
- [7] 王蓉, 马玲, 郭永婷, 等. 优化水肥与滴头间距组合对日光温室黄瓜生长及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2021(4): 75-81.
WANG Rong, MA Ling, GUO Yongting, et al. Effects of optimal water, fertilizer and interval of water dropper combination on growth and yield of cucumber in solar greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2021(4): 75-81.
- [8] 阮晓晗, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于多指标分析和分形维数的不同种植年限压砂地基质流与优先流特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 86-94.
RUAN Xiaohan, BAI Yiru, WANG Youqi, et al. Characteristics of matrix flow and preferential flow in gravel-sand mulched field in different planting years based on multi-index analysis and fractal dimension[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 86-94.
- [9] 贾振江, 赵广兴, 李王成, 等. 宁夏中部干旱带砂土混合覆盖下土壤蒸发估算[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 219-227.
JIA Zhenjiang, ZHAO Guangxing, LI Wangcheng, et al. Estimation of soil evaporation under mixed sand cover in arid regions of central Ningxia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 219-227.
- [10] 马己安, 冯克鹏, 李王成, 等. 基于水面蒸发量的宁夏中部干旱带土壤蒸发量估算研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 35-41.
MA Ji'an, FENG Kepeng, LI Wangcheng, et al. Using water surface evaporation to estimate soil SurfaceEvaporation in arid regions in central Ningxia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 35-41.
- [11] 谭军利, 王西娜, 金慧娟, 等. 微咸水灌溉下砂层级配及覆砂厚度对土壤水盐运移的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 7-13.
TAN Junli, WANG Xi'na, JIN Huijuan, et al. The effects of grading and

- thickness of gravel mulching on water and salt movement in soil under brackish water irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(9): 7-13.
- [12] 马中昇, 谭军利, 马小福, 等. 不同种植年限对压砂地土壤盐分及西瓜产量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(11): 1 200-1 204.
MA Zhongsheng, TAN Junli, MA Xiaofu, et al. Effects of different planting years on soil salinity and watermelon yield in gravel-sand mulched field[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(11): 1 200-1 204.
- [13] 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 Yingchun, ZHANG Fucang, FAN Junliang, 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.
- [14] 葛广华, 殷彩云, 王家强, 等. 塔里木河上游荒漠河岸林土壤水盐分布规律研究[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(6): 7-12, 18.
GE Guanghua, YIN Caiyun, WANG Jiaqiang, et al. Soil water salt distribution rule in desert riparian forests in the upstream of Tarim River[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(6): 7-12, 18.
- [15] 王凤姣, 王振华, 李文昊. 水分传感器位置和灌水阈值对棉花生理及产量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(10): 958-962.
WANG Fengjiao, WANG Zhenhua, LI Wenhao. Effect of water sensor location and irrigation threshold on physiology and yield of cotton[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(10): 958-962.
- [16] 高龙, 田富强, 倪广恒, 等. 膜下滴灌棉田土壤水盐分布特征及灌溉制度试验研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(12): 1 483-1 490.
GAO Long, TIAN Fuqiang, NI Guangheng, et al. Experimental study on soil water-salt movement and irrigation scheduling for cotton under mulched drip irrigation condition[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(12): 1 483-1 490.
- [17] YANG Chuanjie, LUO Yi, SUN Lin, et al. Effect of deficit irrigation on the growth, water use characteristics and yield of cotton in arid Northwest China[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(6): 910-924.
- [18] 王军, 李久生, 关红杰. 北疆膜下滴灌棉花产量及水分生产率对灌水量响应的模拟[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 62-68.
WANG Jun, LI Jiusheng, GUAN Hongjie. Modeling response of cotton yield and water productivity to irrigation amount under mulched drip irrigation in North Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3): 62-68.
- [19] DANIERHAN S, SHALAMU A, TUMAERBAI H, et al. Effects of emitter discharge rates on soil salinity distribution and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under drip irrigation with plastic mulch in an arid region of Northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(1): 51-59.
- [20] MEI X N, SHEN Z Z, REN J, et al. Effects of dripper discharge and irrigation amount on soil-water dynamics under subsurface drip irrigation[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 347/348/349/350/351/352/353: 2 400-2 403.
- [21] 孙浩, 李明思, 丁浩, 等. 滴头流量对棉花根系分布影响的试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 13-18.
SUN Hao, LI Mingsi, DING Hao, et al. Experiments on effect of dripper discharge on cotton-root distribution[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11): 13-18.
- [22] 吴军虎, 陶汪海, 赵伟, 等. 微咸水膜下滴灌不同灌水量对水盐运移和棉花生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 272-276, 329.
WU Junhu, TAO Wanghai, ZHAO Wei, et al. Impact of different irrigation amount of light saline water drip irrigation under mulch on water-salt transport and cotton growth[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 272-276, 329.
- [23] XIE Z K, WANG Y J, JIANG W L, et al. Evaporation and evapotranspiration in a watermelon field mulched with gravel of different sizes in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1/2): 173-184.
- [24] 陆斌, 张胜利, 李侃, 等. 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1 512-1 519.
LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al. Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the Qinling Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1 512-1 519.
- [25] 洪明海, 黄介生, 曾文治, 等. 基于 CT 成像技术的盐渍土壤孔隙结构识别与分析[J]. *中国农村水利水电*, 2016(9): 1-4, 9.
HONG Minghai, HUANG Jiesheng, ZENG Wenzhi, et al. Characterizing and analyzing soil structure by CT tomography technology[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(9): 1-4, 9.
- [26] 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.
TAN Junli, MA Yongxin, WANG Xi'na, et al. Effects of emitter discharge rate and water amount under brackish drip irrigation on water infiltration and distribution of soil moisture and salts with gravel-sand mulching[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3): 113-120.
- [27] 张志刚, 李宏, 李疆, 等. 地表滴灌条件下滴头流量对土壤水分入渗一再分布过程的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 224-231.
ZHANG Zhigang, LI Hong, LI Jiang, et al. Effects of different dripper discharges on soil water infiltration/redistribution under drip irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(2): 224-231.
- [28] 范军亮, 张富仓. 负水头条件下的土壤水分垂直一维入渗特性研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 415-421.
FAN Junliang, ZHANG Fucang. Characteristics of vertical one-dimensional infiltration of soil water under negative hydraulic head[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 415-421.
- [29] 陆军胜, 张富仓, 范军亮, 等. 不同滴头流量和灌水量下农田土壤湿润体特征及其估算模型[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 19-26.
LU Junsheng, ZHANG Fucang, FAN Junliang, et al. Characteristics and estimation model of wetted soil volume under different drip discharge rates and irrigation amounts[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 19-26.
- [30] 李德智, 佟玲, 吴宣毅, 等. 不同滴头流量和灌水频率对玉米产量、耗水及水分利用效率的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(4): 208-215.
LI Dezhi, TONG Ling, WU Xuanyi, et al. Effects of different dripper discharge and irrigation frequency on yield, water consumption and water use efficiency of maize[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(4): 208-215.
- [31] 张宏媛, 逢焕成, 宋佳坤, 等. 亚表层有机培肥调控盐渍土孔隙结构与水盐运移机制[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(2): 355-364.
ZHANG Hongyuan, PANG Huancheng, SONG Jiashen, et al. Effects of pore structure and Water-salt movement for saline soil under subsurface organic amendment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(2): 355-364.
- [32] 孙林, 罗毅, 杨传杰, 等. 不同灌溉量膜下微咸水滴灌土壤盐分分布与积累特征[J]. *土壤学报*, 2012, 49(3): 428-436.
SUN Lin, LUO Yi, YANG Chuanjie, et al. Salt distribution and accumulation in soils different in rate of under-mulch drip irrigation with brackish water[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 428-436.

Effect of Dripping Rate on Soil Water and Salt Redistribution and Growth and Yield of Watermelon in Gravel-mulched Field

YANG Zongkai¹, TAN Junli^{1,2,3*}, WANG Xi'na⁴, MA Rui⁴

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Ningxia Research Center for Water Saving Irrigation and Water Resources Regulation Engineering Technology,

Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agriculture in

Dry Areas, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 4. Agricultural College of Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: **【Objective】**Gravel mulching combined with drip irrigation is an improved agronomic technique for crop production in northwestern China. The purpose of this study is to investigate the impact of dripping rate of the emitters on soil water and salt redistribution, as well as the growth and yield of watermelon. **【Method】** The field experiment had three treatments with the dripping rate controlled at 2 L/h (Q1), 3 L/h (Q2), or 4 L/h (Q3), respectively. In each treatment, we measured the spatiotemporal variation in soil water and salt, water use efficiency, as well as growth, yield and fruit quality of the watermelon. **【Result】** Horizontal advancement of the wetting front in the soil increased with dripping rate. After harvest, soil salt content in the 0~100 cm soil layer decreased, with the decreasing rate increasing as the dripping rate increased. Also, with the increase in dripping rate, the soluble sugar content in the fruits increased first followed by a decline. Of the three dripping rates we compared, Q2 increased the soluble sugar content in the fruit the most, up by 54.3% and 22.3%, respectively, compared to Q1 and Q3. With the increase in dripping rate, the vitamin C content in the fruits decreased first and then ramped up. Q3 gave the highest vitamin C content, increasing by 53.7% compared to Q2. Increasing dripping rate boosted both fruit yield and water use efficiency. Compared to Q1 and Q2, Q3 increased fruit yield by 6.20% and 3.56%, and water use efficiency by 6.49% and 3.72%, respectively. **【Conclusion】** Taking soil water and salt redistribution, as well as watermelon yield and quality into account, the optimal dripping rate for watermelon growth in the gravel-mulched soil was 4 L/h when using the local saline water for irrigation.

Key words: drip irrigation; dripping rate; gravel-sand mulched field; saline water; distribution of water and salt; watermelon

责任编辑：白芳芳