

无膜棉花产量及其根区温湿盐对灌溉量的响应

李军宏¹, 王 军², 李楠楠¹, 郝先哲², 时晓娟¹, 田 雨¹, 石 峰¹, 罗宏海^{1※},
杨国正³

(1. 石河子大学农学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部作物高效用水石河子实验观测站, 石河子 832003; 3. 华中农业大学植物科技学院 武汉 430070)

摘 要: 为揭示无膜棉花产量及其根区温湿盐对深层、夜间灌溉量的响应机制, 在等行距密植 (26 株/m²) 条件下, 以早熟品种‘新陆早 74 号’为试材, 设置 5 个灌水量处理 (W₁, 2 649 m³/hm²; W₂, 2 925 m³/hm²; W₃, 3 201 m³/hm²; W₄, 3 477 m³/hm²; W₅, 3 753 m³/hm²), 研究了棉花产量形成及根区水分、温度和盐分浓度变化规律。结果表明: 棉花籽棉产量 2020 年较 2019 年增加 45.6%~65.5% ($P<0.05$), 其中 W₄ 处理较高, 较其他处理增加 4.1%~10.3% ($P<0.05$)。土壤含水率盛花期前 W₅>W₄>W₃>W₂>W₁, 盛铃期后处理间无差异, 但较盛花期前降低 21.2%~35.0% ($P<0.05$)。土壤电导率 W₃ 处理 0~30 cm 土层较其他处理高 6.4%~19.4% ($P<0.05$)。相关分析表明, 籽棉产量与土壤 0~10 cm 土层电导率显著正相关 ($P<0.05$)、与 pH 值显著负相关 ($P<0.05$)、与土壤>10~20 cm 土层电导率和花期土壤含水率显著正相关 ($P<0.05$)、与盛铃后期温度和 pH 值显著负相关 ($P<0.05$)。因此, 无膜高密度深层、夜间滴灌条件下, 灌水量为 3 477 m³/hm² 可营造适宜棉花生长的根区 (尤其是>10~20 cm 土层) 温度以及盐分环境, 从而获得较高棉花产量。

关键词: 土壤; 灌溉; 地下滴灌; 棉花; 产量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.016

中图分类号: S562;S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0134-10

李军宏, 王军, 李楠楠, 等. 无膜棉花产量及其根区温湿盐对灌溉量的响应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 134-143.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.016 <http://www.tcsae.org>

Li Junhong, Wang Jun, Li Nannan, et al. Yield of non-film cotton and the response of temperature, humidity and salt in the root zone to irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 134-143. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.016 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

新疆地处内陆干旱区, 光热资源丰富, 2019 年棉花播种面积 254.11 万 hm²、总产量 500.2 万 t, 占全国总播种面积的 76.1%、总产量的 84.9%、世界棉花总产量的 19.0%^[1]。然而, 随着地膜使用时间和强度的增加, 造成了严重的残膜污染^[2]。新疆棉田地膜残留量大, 达 158.4 kg/hm², 且以每年 15.69 kg/hm² 的速度累积^[3]。农田残膜量累积会破坏农田土壤结构, 导致耕地质量下降、农事耕作受阻、作物品质和产量下降等一系列问题^[4]。通过对新疆多年气象资料、栽培措施、产投比等分析, 迎接这一挑战的基本思路是以“绿色高效”为宗旨, 以“无膜栽培”为手段, 以“减投不减产”为出发点和落脚点, 高效协调现有生产条件, 打破制约棉花生产可持续发展的关键环境因素限制, 推动新疆棉花产业向绿色高效、持续发展转型。

无膜栽培虽然消除了残膜污染的根源, 但失去了地膜在增温保墒方面的重要作用^[5], 导致土壤水分损失快、春季土壤温度上升慢, 播种时间推迟, 棉花产量得不到保障^[2,6]。如何采取有效调控措施, 改善土壤水热条件, 促进植株生长, 这是实现无膜棉高效生产的关键。王雷山等研究表明, 在不影响棉花产量的前提下缩短棉花大田生长期 (推迟播种时间), 增加种植密度, 可减少物质 (尤其是肥料) 投入, 从而提高棉花生产效益^[7]。Chen 等^[8]研究表明, 棉花覆膜条件下, 20 cm 深度灌溉施肥配合生育期适宜水氮供应, 有利于优化根区水氮环境, 促进根系下扎, 提高棉花产量。夜间灌溉导致玉米高度和产量高于白天灌溉^[9]。因此, 在目前栽培技术条件下, 利用深埋滴灌带和夜间灌水在抑制土壤蒸发及早熟棉品种和高密度栽培在缩短生育期等方面优势, 形成无膜棉高密度深夜滴灌模式, 充分挖掘棉花生物学增产潜力, 在不显著降低产量的基础上, 避免环境污染, 这是实现新疆棉花高效可持续生产的主要途径之一。

灌水量发生变化会直接影响土壤含水量、土壤温度^[10]、土壤盐分运移^[11], 进而影响根区环境, 通过棉花根系分布形态进行调控从而影响其地上部分生长和产量^[12]。目前在无膜高密度深层、夜间滴灌条件下, 灌水量对棉花

收稿日期: 2021-04-30 修订日期: 2021-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31760355); 新疆兵团中青年领军人才 (2017CB005)

作者简介: 李军宏, 研究方向为作物高产生理与节水栽培。

Email: 1181634049@qq.com

※通信作者: 罗宏海, 教授, 博士生导师, 研究方向为作物高产生理与节水栽培。Email: luohonghai79@163.com

产量及其根区温湿盐的影响效应尚未见报道。基于此，本文在无膜深层、夜间滴灌条件下，选用早熟棉品种和等行距密植模式（26 株/m²），通过设置 5 个灌水量处理，研究了棉花产量形成及根区水分、温度和盐分浓度变化规律，分析了上述参数之间的相关性，研究结果为无膜棉高效栽培技术体系的制定奠定理论基础，对未来新疆棉花产业走上节能环保之路具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于 2019—2020 年在农业农村部作物高效用水石河子实验观测站（45°38'N，86°09'E）进行，海拔 430 m。试验地土壤 0~20 cm 土层 pH 值为 7.86，电导率为 567 μS/cm，速效钾为 174 mg/kg，有效磷为 29 mg/kg，有机质为 23 g/kg。试验参试品种为‘新陆早 74 号’（生育期 120 d），由石河子农业科学研究院棉花所提供。

2019 年棉花生育期内降水总量为 98.2 mm，大于 5 mm 的有效降雨 7 次，5 月 1 日—8 月 31 日，日平均最高气温为 30.9 ℃，日平均最低气温为 16.2 ℃；2020 年整个生育期累积降水 52.3 mm，大于 5 mm 的有效降水 3 次，5 月 1 日—8 月 31 日，日平均最高气温为 31.4 ℃，日平均最低气温为 16.6 ℃（图 1）。

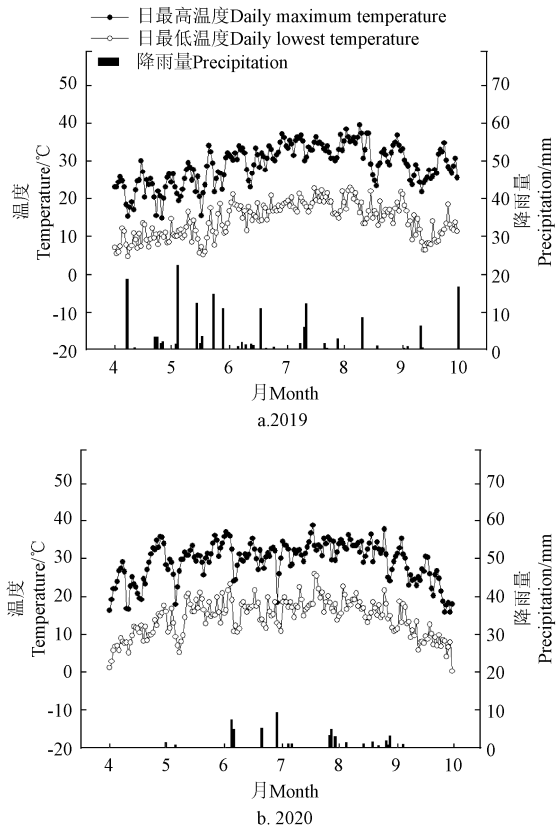


图 1 2019—2020 年试验区域气温和降雨量情况
Fig.1 Temperature and precipitation in the test area from 2019 to 2020

1.2 方法

1.2.1 试验设计

设置 5 个灌水量处理：2 649 m³/hm²（W₁）；2 925 m³/hm²（W₂）；3 201 m³/hm²（W₃）；3 477 m³/hm²（W₄）；3 753 m³/hm²（W₅）（其中 W₁~W₃ 处理为地下滴灌平均灌水量，W₄ 和 W₅ 处理为大田覆膜节水滴灌平均灌水量^[13-14]。）（表 1）。小区面积 72.96 m²（4.56 m×16.0 m），随机区组设计，重复 4 次。

表 1 2019—2020 年不同处理灌水周期及灌水量

Table 1 Irrigation cycles and irrigation amount under different treatments from 2019 to 2020 (m ³ ·hm ⁻²)		处理 Treatments				
年份 Year	日期 Date	W ₁	W ₂ ^[13]	W ₃	W ₄	W ₅ ^[14]
2019	05-10	150	150	150	150	150
	05-13	150	150	150	150	150
	06-15	162	180	198	216	234
	06-22	162	180	198	216	234
	06-29	162	180	198	216	234
	07-01	189	210	231	252	273
	07-03	189	210	231	252	273
	07-05	189	210	231	252	273
	07-09	216	240	264	288	312
	07-15	216	240	264	288	312
	07-21	246	270	294	318	342
	07-27	246	270	294	318	342
	08-07	189	210	231	252	273
	08-20	129	150	171	192	213
	08-30	54	75	96	117	138
合计 Total		2 649	2 925	3 201	3 477	3 753
2020	05-05	150	150	150	150	150
	05-08	150	150	150	150	150
	06-22	180	210	240	270	300
	07-02	240	270	300	330	360
	07-11	270	300	330	360	390
	07-19	313.5	345	376.5	408	439.5
	07-26	342	375	408	441	474
	08-03	313.5	345	376.5	408	439.5
	08-11	270	300	330	360	390
	08-20	240	270	300	330	360
合计 Total		2 649	2 925	3 201	3 477	3 753

开春解冻后，如图 2 所示，开沟 15 cm 埋入滴灌带（采用以色列耐特菲姆公司生产的专用滴灌带及其配件，滴头流量：2019 年 1.0 L/h，2020 年 2.0 L/h），每两行 1 根；每处理安装独立阀门。2019 年 5 月 10 日播种，保苗株数 19.2 万株/hm²，2020 年 5 月 5 日播种，保苗株数 23.25 万株/hm²。在水平距离滴灌带 38 cm 处，点播，播种深度 3.0~3.5 cm，播后及时灌水，出苗水 300 m³/hm²。全生育期每 hm² 基施尿素（N 46%）150 kg、重过磷酸钙（P₂O₅ 45%）225 kg；生育期每 hm² 随水滴施尿素（N 46%）525 kg、磷酸二氢钾（P₂O₅ 52%、K₂O 34%）150 kg。其他管理措施与常规栽培技术相同。

1.2.2 测定项目与方法

1) 土壤水分含率

含水率采用便携式土壤温湿盐测量仪（HMSCAN-2M，

USA) 测定, 测试深度为 80 cm, 每 10 cm 为一层, 测定周期每 7 d 一次^[15]。

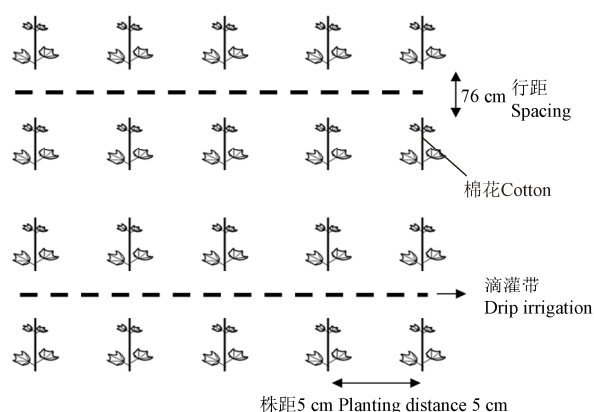


图 2 试验区滴灌带埋设示意图

Fig.2 Schematic diagram of embedding drip irrigation belt in the test area

2) 土壤 pH 值和电导率

用土钻在每个试验小区距棉花 38 cm 和棉花行处取土壤剖面 0~10、>10~20、>20~30 cm 土层土样, 剔除土壤样品中的杂物, 风干、磨碎、过 1 mm 孔径的筛, 土壤 pH 值采用 pH 计测定, 土壤含盐量采用电导法测定^[16]。

3) 棉田土壤温度分布

土壤温度使用纽扣式温度记录仪 (美信 DS1921G) 进行测定, 温度采集深度为 5、10、20、30、40 cm 土层, 采集间隔为 2 h 一次。

4) 棉花产量

根据棉花成熟情况, 统计每小区单位面积 (3 m × 1.52 m) 株数、单株铃数, 并分 2 次采收其全部吐絮铃, 每个处理重复 4 次, 进行产量计算。

1.3 数据处理与统计

数据处理 Microsoft Excel 2019 软件, 统计分析 SPSS19.0 软件, 显著性检验采用 Duncan 法 ($P<0.05$), 绘图用 Sigmaplot 12.5 软件, 图中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 灌水量对无膜棉花产量的影响

由表 2 可以看出, 棉花籽棉产量均随灌水量的增加呈增加趋势, 在 W_5 处理略有下降; 因在 2019 年基础上优化 2020 年灌水频率, 使 2020 年产量较 2019 年相比增加 45.6%~65.5% ($P<0.05$)。2019 年 W_4 处理条件下产量比 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_5 处理分别高 19.9%、22.7%、7.6%、13.3%; 2020 年 W_4 处理条件下产量比 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_5 处理分别高 10.3%、7.9%、4.1%、6.2%; 两年 W_4 处理均与 W_3 、 W_5 差异不显著 ($P>0.05$), 与 W_1 、 W_2 差异显著 ($P<0.05$)。这表明灌水量增加会提高棉花产量, 但是当增加到一定阈值时, 产量就不会继续增加。

进一步分析产量构成因素可以看出, 总铃数随灌水量的增加呈先增加后降低趋势, 表现为 W_4 处理总铃数较 W_1 、 W_2 、 W_5 处理增加 11.4%、11.8%、4.2%, 较 W_3 处

理降低 2.5%, 且显著高于 W_1 、 W_2 处理 ($P<0.05$), 与 W_3 、 W_5 处理差异不显著 ($P>0.05$)。两年单铃质量均为 W_4 处理最高, 较其他处理增加 2.2%~4.1%, 2019 年与 W_2 、 W_3 、 W_5 处理差异显著 ($P<0.05$), 2020 年差异不显著 ($P>0.05$), 可能由于 2020 年气温比 2019 年高, 播期较 2019 年提前了 5 d, 且 2020 年对灌水频率和灌水定额进行了优化, 有利于棉铃发育。

表 2 不同灌水量棉花产量和产量构成因素变化

Table 2 Variation of yield and yield components of cotton with different irrigation amount

年份 Year	处理 Treatments	籽棉产量 Seed yield (kg·hm ⁻²)	总铃数 The total number of the bell	单铃质量 Single boll weight/g
2019	W_1	2 792.04±118.76b	743 593.5±18 463.7c	4.34±0.12ab
	W_2	2 727.93±140.81b	735 758.7±48 044.2c	4.17±0.05b
	W_3	3 112.55±122.65ab	938 038.9±17 706.4a	4.19±0.06b
	W_4	3 347.60±70.51a	904 990.3±30 231.1ab	4.46±0.11a
	W_5	2 955.86±47.45ab	853 280.6±30 734.4b	4.22±0.07b
2020	W_1	4 417.27±30.10b	961 586.5±22 685.1b	4.85±0.11b
	W_2	4 515.49±22.88b	963 011.1±7 867.5b	5.05±0.15ab
	W_3	4 682.82±62.69ab	1 009 309.7±11 953.8a	5.06±0.09ab
	W_4	4 873.13±167.00a	993 779.4±20 412.7ab	5.11±0.04a
	W_5	4 589.55±65.73ab	968 709.4±20 341.3ab	5.15±0.03a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same line indicate significant difference among treatments for same season ($P<0.05$).

2.2 灌水量对无膜栽培棉花土壤含水率的影响

试验表明 (图 3), 2019—2020 年不同处理土壤含水率随土层深度的增加呈升高趋势。出苗后 0~46 d 0~80 cm 土层平均土壤含水率随灌水量增加而升高, 各处理间无显著差异 ($P>0.05$)。0~20 cm 土层中各处理土壤含水率无显著差异 ($P>0.05$), 较 >20~80 cm 土层显著降低 44.6%~52.5% ($P<0.05$); >20~40 cm 土层中, W_1 土壤含水率较其他处理降低 1.9%~10.7%, 差异显著 ($P<0.05$)。

出苗后 46~67 d, 0~80 cm 土层内, W_5 处理土壤含水率最高, 为 33.34%; W_1 处理最低, 为 30.87%, W_5 处理较其他处理高 4.7%~8.0%。出苗后 67~88 d, >60~80 cm 土层内, W_1 处理土壤含水率较其他处理降低 5.8%~17.1% ($P<0.05$)。出苗后 88~109 d 土壤含水率较 0~88 d 相比降低 21.2%~35.0% ($P<0.05$)。综上, 灌水量主要影响了前 88 d 土壤含水率变化, 尤其是 >40~80 cm 土层, 且随灌水量的增加土壤含水率显著增加。

2.3 灌水量对无膜栽培棉花土壤温度的影响

土壤温度变化是随着太阳辐射和大气温度的变化而吸收或释放能量的过程^[17]。如图 4 所示, 不同处理土壤温度均随生育期推进呈下降趋势, 各处理土壤温度在播种后 55~75 d 达到峰值; 0~55 d, W_1 处理的夜间土壤温度最低, 比其他处理分别低 0.8%、1.0%、0.8%、1.0%, 这可能由于土壤含水率过低, 土壤热容量小, 晚上和清晨随着气温的降低降温速度也比较快^[18]。在 55~95 d, 0~20 cm 土层内, W_5 处理夜间温度比其他处理分别低 0.8%、0.7%、1.8%、0.7%; >20~40 cm 土层内, W_4 处

理夜间温度比其他处理分别低 1.2%、1.1%、1.7%、1.4%。 W_4 处理土壤温度在播种后 0~55 d 和 95~135 d 分别比其他处理高 0.4%~1.3%、0.4%~2.4%。说明棉花根区土壤温度变化与含水率变化密切相关，含水率降低温度就会上升。

2.4 灌溉量对无膜栽培棉花土壤 pH 值的影响

土壤 pH 值是影响土壤肥力、反映土壤盐碱度的重要

因素之一。2019—2020 年土壤 pH 值变化如图 5 所示。随土层深度的增加，pH 值呈增加趋势；2019 年 pH 值随灌水量的增加呈先增加后降低趋势；2020 年 pH 值随灌水量的增加呈增加趋势。在 0~30 cm 土层，不同灌水量处理 pH 值存在差异，总体表现为下层 pH 值要高于表层，说明表层含水率下降、水分向深层移动，导致表层土壤温度增加，抑制盐分表聚。

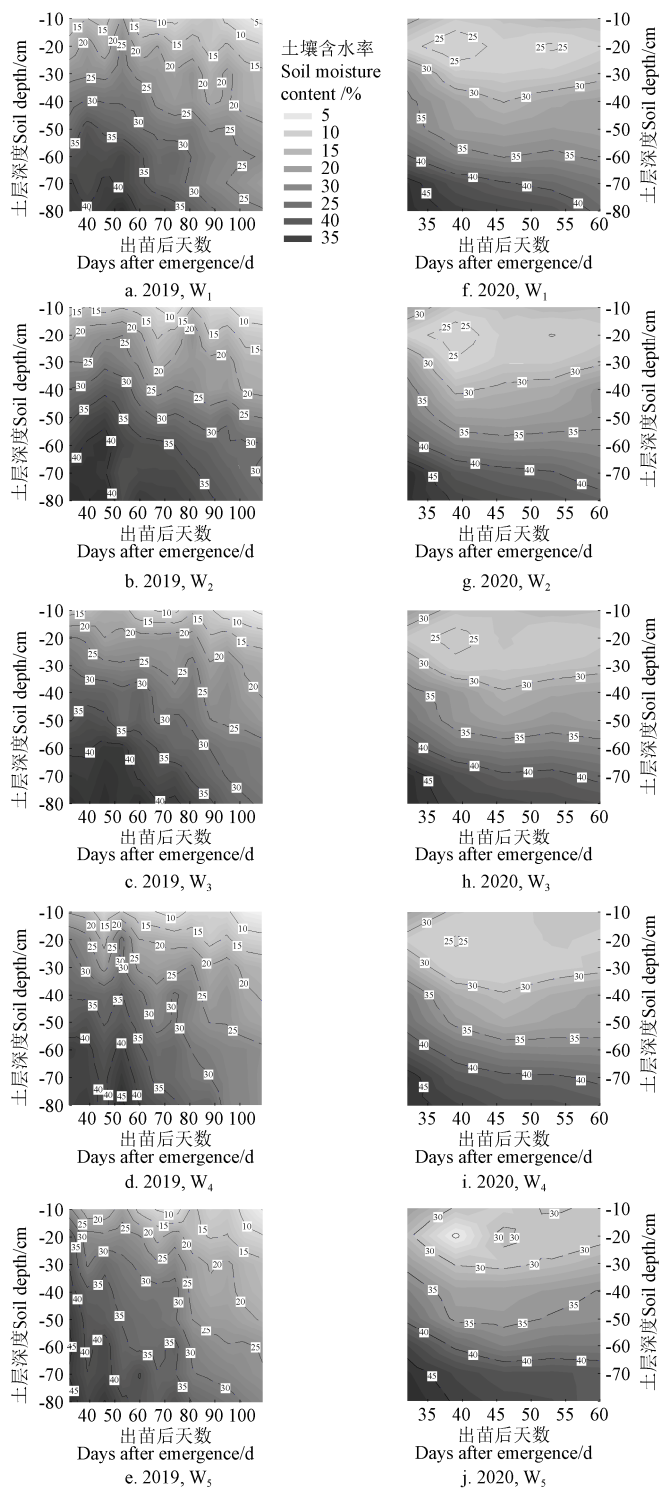


图 3 2019—2020 年灌水量对不同时棉田土壤含水率的影响
Fig.3 Effects of irrigation amount on soil moisture content of cotton field in different periods from 2019 to 2020

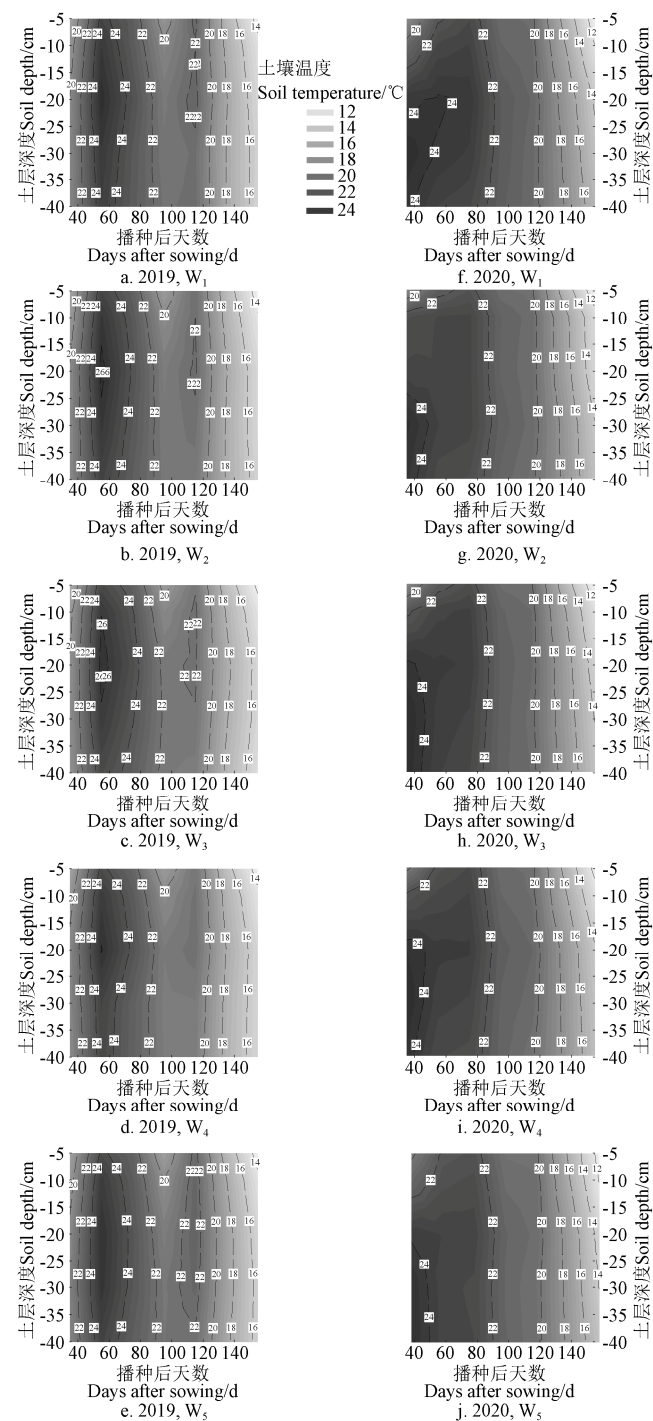


图 4 2019—2020 年灌水量对不同时棉田土壤温度的影响

Fig.4 Effects of irrigation amount on soil temperature of cotton field in different periods from 2019 to 2020

2019—2020 年 pH 值分别在出苗后 67、89 d 达到最大值, W_3 处理土壤 pH 值比其他处理低 0.7%、0.5%、0.8%、1.5%, W_5 处理保持较高水平; 在出苗后 0~60 d, 0~30 cm 土层内, W_4 处理比其他处理分别降低 0.4%、0.8%、0.1%、0.7%。在 90~120 d, 0~10 cm 土层内, W_3 处理最低, W_1 处理比其他处理高 0.5%、1.2%、1.0%、0.2%; >10~30 cm 土层内, W_4 处理 pH 值比其他处理低 1.1%、0.9%、0.7%、0.7%。说明土壤含水率降低, 土壤温度增加,

其 pH 值会降低。

2.5 不同灌水量对无膜栽培棉花土壤电导率的影响

土壤电导率是土壤中水溶性盐的指标。2019—2020 年土壤电导率值分布见图 6。随土层深度增加电导率呈降低趋势; 随生育期推进电导率呈逐渐增加趋势。两年数据显示 0~10 cm 土层含盐度较高, 电导率值范围在 404.3~515.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间, W_4 处理电导率较 W_1 、 W_2 、 W_5 处理增加 7.6%~12.2% ($P<0.05$)。0~10 cm 较 >20~30 cm

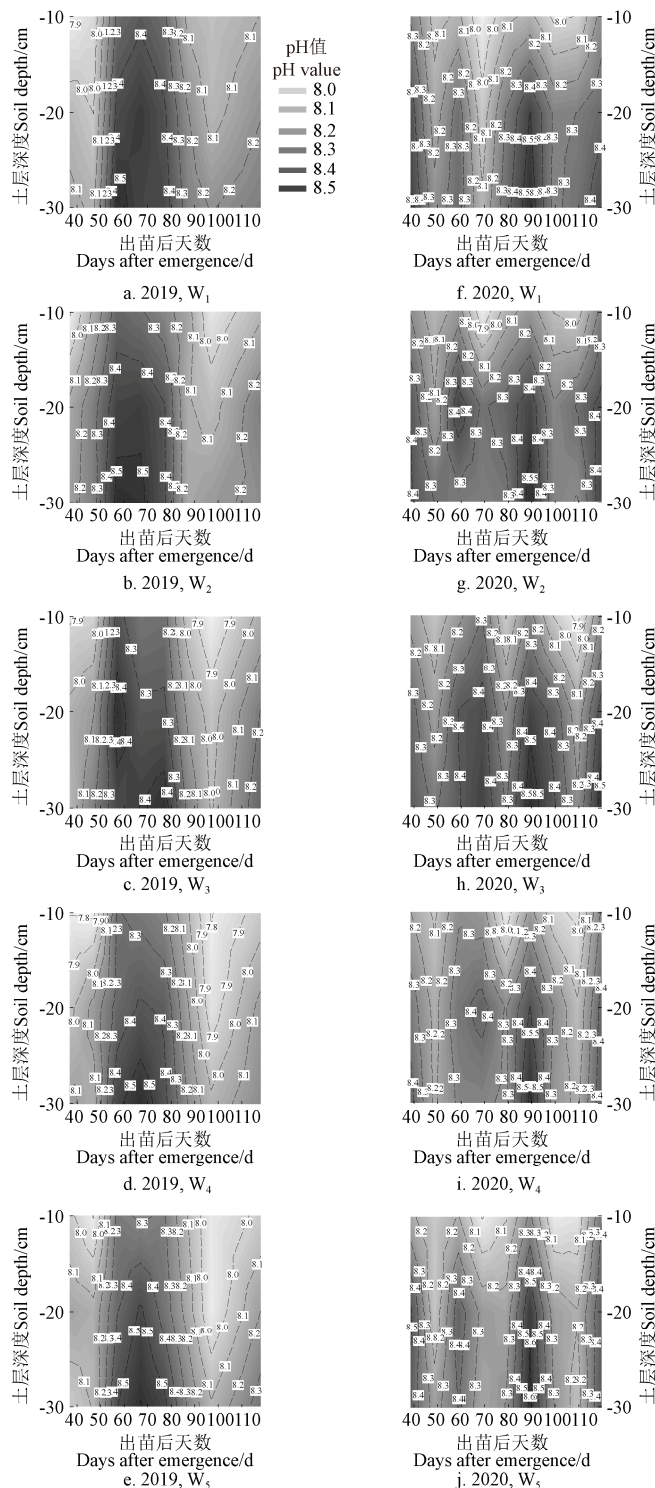


图5 2019—2020 年灌水量对不同时棉田土壤 pH 值的影响
Fig.5 Effect of irrigation amount on soil pH value of cotton field in different periods from 2019 to 2020

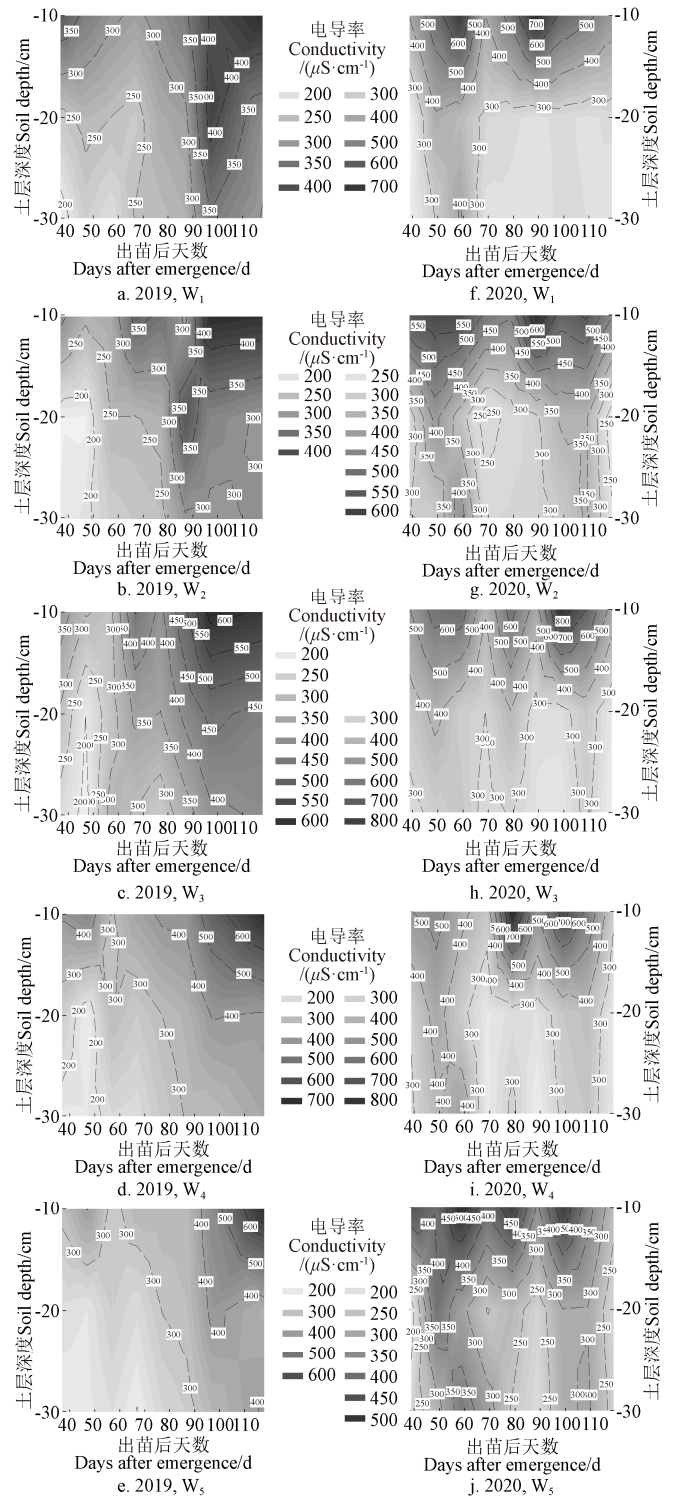


图6 2019—2020 年灌水量对不同时棉田土壤电导率的影响
Fig.6 Effect of irrigation amount on soil conductivity of cotton field in different periods from 2019 to 2020

土层相比，电导率显著增加 48.8%~76.6% ($P<0.05$)。在出苗后 0~60 d，0~30 cm 土层内，W₃ 处理电导率分别比其他处理高 6.5%、8.5%、3.6%、14.3%。在出苗后 60~90 d，各处理在 0~10 cm 和>20~30 cm 土层内，W₅ 处理分别比其他处理低 13.9%~22.9%、0.6%~12.7% ($P<0.05$)。在出苗后 90~120 d，0~10 cm 和>20~30 cm 土层内，W₁ 处理最低，W₃ 处理电导率最高，分别比其他处理高 8.7%~36.1%、1.1%~13.7% ($P<0.05$)。说明夜间、深层灌溉会使水分向下运移，白天随着地表温度上升，深土层中的可溶性盐离子随着水分的蒸发上行并在地表积聚，导致表层电导率增加。

2.6 各指标相关性分析

由表 3 可以看出，2019 年，产量与蕾期 10 cm 土层电导率呈显著正相关关系、与 pH 值呈显著负相关关系；

与 30 cm 土层电导率呈极显著负相关关系；产量与花期 10 cm 土层 pH 值呈极显著负相关关系，与 20 cm 土层土壤含水率呈显著正相关关系；产量与盛铃后期 0~20 cm 电导率呈极显著正相关关系，与 pH 值呈极显著负相关关系。

2020 年，产量与蕾期 20 cm 土层土壤含水率和土壤温度呈显著负相关关系，与电导率和 pH 值呈显著正相关关系，与 30 cm 土层土壤温度呈显著负相关关系，与电导率呈极显著正相关关系；产量与花期 10 cm 土层电导率呈显著负相关关系，与 pH 值呈极显著正相关关系，与 20 cm 土层土壤温度呈显著负相关关系，与 pH 值呈极显著正相关关系；产量与盛铃后期 20 cm 土层土壤温度和 pH 值呈显著负相关关系，与电导率呈显著正相关关系。

表 3 产量与不同时期棉花各指标之间相关性分析
Table 3 Correlation analysis between yield and cotton indexes in different periods

年份 Year	土层深度 Soil depth/cm	指标 Indexes	蕾期 Squaring				花期 Flowering				盛铃后期 Later full boll			
			温度	电导率	pH 值	籽棉产量	温度	电导率	pH 值	籽棉产量	温度	电导率	pH 值	籽棉产量
2019	10	含水率	-0.169	0.316	-0.055	0.312	-0.043	-0.098	0.074	0.121	-0.235	0.033	-0.313	0.086
		温度	1	-0.013	-0.041	0.003	1	-0.093	-0.002	0.171	1	0.123	0.341	-0.098
		电导率		1	-0.729**	0.596*		1	-0.858**	0.435		1	-0.784**	0.750**
		pH 值			1	-0.558*			1	-0.648**			1	-0.761**
	20	含水率	0.318	-0.205	0.239	0.03	-0.164	0.208	-0.161	0.583*	-0.564**	-0.013	-0.036	0.149
		温度	1	0.528*	-0.156	-0.003	1	-0.046	0.209	0.08	1	-0.09	0.197	-0.344
		电导率		1	-0.442	-0.42		1	-0.907**	0.398		1	-0.503	0.745**
		pH 值			1	-0.183			1	-0.509			1	-0.755**
	30	含水率	0.3	0.134	-0.491	0.242	0.361	0.008	0.124	0.434	-0.326	-0.078	-0.289	0.14
		温度	1	-0.124	-0.059	0.308	1	-0.3	0.381	0.324	1	0.692**	0.677**	-0.007
		电导率		1	-0.268	-0.644**		1	-0.967**	-0.087		1	0.448	0.506
		pH 值			1	-0.3			1	0.181			1	-0.3
	10	含水率	-0.005	-0.391	0.18	-0.086	0.044	-0.106	0.057	0.158				
		温度	1	-0.197	0.186	-0.182	1	-0.118	0.083	-0.266	1	0.016	-0.263	-0.12
		电导率		1	-0.692**	0.065		1	-0.602*	-0.553*		1	-0.48	0.262
		pH 值			1	0.08			1	0.744**			1	-0.234
2020	20	含水率	0.431*	-0.321	-0.359	-0.624*	-0.726**	-0.660**	0.283	0.367				
		温度	1	-0.581*	-0.065	-0.654**	1	0.524*	-0.626*	-0.629*	1	-0.636*	0.342	-0.639*
		电导率		1	0.214	0.568*		1	-0.158	-0.188		1	-0.34	0.582*
		pH 值			1	0.586*			1	0.734**			1	-0.638*
	30	含水率	0.351	-0.543*	0.163	-0.48	-0.408*	-0.596*	0.115	0.284				
		温度	1	-0.654**	0.397	-0.548*	1	-0.235	-0.207	-0.219	1	0.07	0.319	0.362
		电导率		1	-0.475	0.660**		1	-0.006	-0.229		1	-0.509	0.414
		pH 值			1	-0.491			1	0.403			1	-0.339

注：**. 在 0.01 水平（双侧）上显著相关。*. 在 0.05 水平（双侧）上显著相关。
Note: **. Significant correlation at 0.01 level (bilateral). *. Significant correlation at 0.05 level (bilateral).

3 讨 论

3.1 土壤含水率对无膜深层滴灌灌水量变化的响应

棉花的生长速度除了与本身生理特点有关，还与土壤含水率和灌水有关^[19]。随灌水量的增加，>10~40 cm 土层含水率增大，而 40 cm 以下土壤含水率受灌水量影响较小^[20]；无膜滴灌土壤含水率随灌水定额的增加整体表现为增加趋势，不同灌水定额 0~20 cm 土层土壤含水率波动明显^[21]。本试验表明，随灌水量的增加，>20~

60 cm 土层含水率增大，0~20 cm 土层含水率受灌水量影响较小，20 cm 以下受灌水量影响较大。在出苗后 88 d 以前土壤含水率随灌水量增加而增加，差异显著，88 d 以后各处理间差异不显著。这表明与覆膜滴灌不同，无膜深层、夜间灌溉模式下表层含水率波动小，深层含水率变化明显，运移到表层的含水率降低可减少因不覆膜而造成的水分蒸发。

高频灌溉使表层土壤含水率过高或产生积水，40 cm 以下深层土壤湿润不够，大量水分被蒸发而不能向下运

移被作物根系吸收利用,不利于产量形成;低频滴灌水分补充不及时,表层土壤含水率较低;7 d 处理下不同土层的土壤含水率变化较小,棉花产量表现最高^[14,22-23]。本试验中,2019 年蕾期高频滴灌(滴水周期 2 d)下,表层含水率较低,>40~80 cm 土层含水率升高;在盛铃后期低频滴灌(滴水周期 10 d)下,各土层土壤含水率均减小;2020 年中频滴灌(滴水周期 7 d)下,各土层含水率变化较小。可能本试验不覆膜改变了 0~20 cm 土层温度和蒸发速度,滴灌带埋设在 15 cm 土层使向下渗透的水量多于向上蒸发的水量,导致表层土壤含水率减少。因此,中频灌溉(滴水周期 7 d)能减少表层水分蒸发,保持中下层土壤含水率充足,增加根系附近土壤含水率。

3.2 土壤温度、电导率、pH 值对土壤含水率变化的响应

土壤温度升高将使导水率增大,有利于根系吸水,作物根系耗水使根区土壤含水率发生变化^[24,15]。水分的热容量较高,在土壤含水率高的区域,土壤增温较慢;在土壤含水率低的区域,土壤增温快^[25]。覆膜栽培夜间地膜阻隔了土壤与大气之间的热交换,起到保温作用^[18]。本试验表明,因不覆膜会导致 10 cm 土层温度受气温影响明显,变化幅度较大,保温效果明显低于膜下滴灌;夜间温度受灌水制度影响较大,20 和 30 cm 土层温度均随含水率的减少而升高。

土壤盐分运移的载体是土壤水分^[26]。前人研究发现增加滴水频率可使含盐量持续处于一个较低的状态^[27];灌水量增加不会显著影响土壤 pH 值^[28],可以降低盐分的累积并获得高产^[29];而灌水量较少,表层会积聚大量的盐分离子^[30]。本试验表明,各处理在 0~10 cm 土层发生积盐现象,在>20~30 cm 土层内含盐量降低。可能是因为滴灌过程中上层土壤盐分向下迁移集中在湿润体的边缘,土壤湿润体内部会形成一个盐分浓度较低的淡化区^[31];也可能是夜间、深层灌溉会使水分向下运移,白天随着地表温度上升至深土层中的可溶性盐分离子随着水分的蒸发上行并在地表积聚。

3.3 棉花产量对无膜深层滴灌灌水量变化的响应

本试验最高籽棉产量为 W₄ 处理 4 873 kg/hm²,衣分 42.8% (数据未列出),皮棉产量 2 086 kg/hm²,当年新疆单位面积皮棉产量为 2 063 kg/hm²。说明在没有增加用水量的条件下,无膜棉花的产量亦可以达到新疆棉花平均产量。通过两年比较发现,2020 年比 2019 年保苗株数增加 4.05 万株/hm²、日平均最高气温高 0.5℃、播期早 5 d、单铃质量高 17.9%,棉铃发育良好,因而产量最高。说明,通过进一步优化灌溉频率可以进一步挖掘无膜棉产量潜力^[32]。

吴曦等^[33]发现土壤 pH 值与灌水量呈显著正相关关系。万书勤等^[34]发现灌溉水的电导率大于 1.1 dS/m 时,电导率越大黄瓜产量越低。本试验表明,籽棉产量与土壤 0~20 cm 土层电导率、pH 值、花期土壤含水率以及盛铃后期土壤温度具有显著的相关性。说明栽培模式由覆膜转变为无膜后,深层、夜间灌溉棉花通过增加根系集中区土壤含水率使深层滴灌带附近为主要耗水层,降

低地表无效蒸发,提高灌溉水利用效率,进而改变根区土壤含盐量及温度,调控棉花根区无机环境,最终影响棉花产量。

4 结 论

本文研究了棉花产量形成及根区水分、温度和盐分浓度变化规律,探究无膜棉花产量及其根区温湿盐对深层、夜间灌溉量的响应机制,得到以下结论。

1) 无膜高密度深层、夜间滴灌模式下,0~20 cm 土层中土壤含水率较>20~60 cm 土层显著降低 44.6%~52.5%,0~10 cm 较>20~30 cm 土层,电导率显著增加 48.8%~76.6%、pH 值降低 2.5%~2.9%。无膜深层、夜间滴灌模式促进水分下移,降低表层土壤含水率,增加滴灌带附近土壤温度,抑制盐分表聚。

2) 随着土壤含水率减少,土壤温度升高,pH 值降低,电导率增加。与其他处理相比,W₄ 处理土壤温度在播种后 0~55 和 95~135 d 分别高 0.4%~1.3%和 0.4%~2.4%、电导率增加 7.6%~12.2%。

3) 总铃数、单铃质量和籽棉产量随着灌水量的增加呈先增加后降低趋势。籽棉产量与土壤>10~20 cm 土层电导率、pH 值、花期土壤含水率以及盛铃后期土壤温度具有显著的相关性。当灌水量为 3 477 m³/hm²有利于营造适宜棉花生长的根区温度、电导率、pH 值环境,籽棉产量达到 4 873 kg/hm²,实现了无膜棉高效生产的目标。

【参 考 文 献】

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据 [EB/OL]. 2019-12-17[021-04-30]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201912/t20191217_1718007.html.
- [2] 喻树迅. 无膜棉对中国棉花产业转型升级的意义[J]. 农学报, 2019, 9(3): 1-5.
Yu Shuxun. The Significance of filmless cotton to promote the transformation and upgrading of China's cotton industry[J]. Journal of Agriculture, 2019, 9(3): 1-5. (in Chinese with English Abstract)
- [3] Zhang D, Liu H, Hu W, et al. The status and distribution characteristics of residual mulching film in Xinjiang, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(11): 2639-2646.
- [4] 卢勇涛, 王吉亮, 营雨坤, 等. 新疆农田地膜污染治理现状思考[J]. 农业机械, 2021, 877(1): 70-72.
- [5] 祖米来提·吐尔干, 林涛, 严昌荣, 等. 地膜覆盖时间对新疆棉田水热及棉花耗水和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 113-120.
Zumilaiti Tuergen, Lin Tao, Yan Changrong, et al. Effect of plastic film mulching duration on soil temperature and moisture in field and cotton water consumption and yield in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018,

- 34(11): 113-120. (in Chinese with English Abstract)
- [6] 张国伟, 张祥, 陈德华, 等. 播期对内蒙古西部荒漠区棉花产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 863-870.
- Zhang Guowei, Zhang Xiang, Chen Dehua, et al. Effect of sowing dates on cotton yield, fiber quality, and uptake and utilization of nutrients in Inner Mongolia west desert area, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(3): 863-870. (in Chinese with English Abstract)
- [7] 王雷山, Khan Aziz, 袁源, 等. 播期和密度对棉花叶柄和根系硝态氮含量的影响[J]. 棉花学报, 2016, 28(6): 574-583.
- Wang Leishan, Khan Aziz, Yuan Yuan, et al. Nitrate content distributions in petioles and roots of cotton affected by sowing date and planting density[J]. Cotton Science, 2016, 28(6): 574-583. (in Chinese with English Abstract)
- [8] Chen Z K, Tao X P, Khan A, et al. Biomass accumulation, photosynthetic traits and root development of cotton as affected by irrigation and nitrogen-fertilization[J]. Frontiers in plant science, 2018, 9: 173.
- [9] José Cavero, Eva T Medina, Francisco Montoya. Sprinkler irrigation frequency affects maize yield depending on irrigation time[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(5): 1-12.
- [10] 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水土盐运移规律[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 144-152.
- Sun Guanfang, Qu Zhongyi, Du Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 144-152. (in Chinese with English Abstract):
- [11] 明广辉, 田富强, 胡宏昌. 地下水埋深对膜下滴灌棉田水盐动态影响及土壤盐分累积特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 90-97.
- Ming Guanghui, Tian Fuqiang, Hu Hongchang. Effect of water table depth on soil water and salt dynamics and soil salt accumulation characteristics under mulched drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(5): 90-97. (in Chinese with English Abstract)
- [12] 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 Dongwei, Li Mingsi, Zhou Xinguo, 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 (Transactions of the CSAE), 2018, 34(9): 130-137. (in Chinese with English Abstract)
- [13] 孔繁明. 地下滴灌在棉花上的应用效果研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013.
- Kong Fanming, Research on the Effects of Subsurface Drip Irrigation In Cotton[D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese with English Abstract)
- [14] 刘梅先, 杨劲松, 李晓明, 等. 膜下滴灌条件下滴水量和滴水频率对棉田土壤水分分布及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3203-3210.
- Liu Meixian, Yang Jingsong, Li Xiaoming, et al. Effects of irrigation amount and frequency on soil water distribution and water use efficiency in a cotton field under mulched drip irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3203-3210. (in Chinese with English Abstract)
- [15] 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 Dongwei, Li Mingsi, Liu Dong, 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. (in Chinese with English Abstract)
- [16] 王旭, 樊丽琴, 李磊, 等. 种植方式和灌溉定额对碱化盐土及紫穗槐生长的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 88-95.
- Wang Xu, Fan Liqin, Li Lei, et al. Effects of planting patterns and irrigation quotas on alkalized solonchak and growth of amorphia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 88-95. (in Chinese with English Abstract)
- [17] 王卫华, 王全九, 刘建军. 南疆棉花苗期覆膜地温变化分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 139-145.
- Wang Weihua, Wang Quanjiu, Liu Jianjun, et al. Analysis for the feasibility of achieving high yield and nutrient efficiency at low fertilizer input[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(1): 139-145. (in Chinese with English Abstract)
- [18] 陈丽娟, 张新民, 王小军, 等. 不同土壤水分处理对膜上灌春小麦土壤温度的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 9-13.
- Chen Lijuan, Zhang Xinmin, Wang Xiaojun, et al. Effect of different soil moisture treatments on soil temperature of plastic film mulched spring wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 9-13. (in Chinese with English Abstract)
- [19] 曹黎. 土壤水分含量与棉花各生育期灌水和棉花产量的关系探讨[J]. 农业与技术, 2020, 40(18): 38-40.
- [20] 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.
- 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. (in Chinese with English Abstract)
- [21] 王洪博, 曹辉, 高阳, 等. 南疆无膜滴灌棉花灌溉制度对土壤水分和产量品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(5): 26-34.
- Wang Hongbo, Cao Hui, Gao Yang, et al. The effects of drip-irrigation scheduling without mulching on soil moisture, yield and quality of cotton in southern Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(5): 26-34. (in Chinese with English Abstract)
- [22] 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. (in Chinese with English Abstract)
- [23] 王新燕, 龚照龙, 郑巨云, 等. 不同频率膜下滴灌对棉花农艺性状及产量的影响[J]. 棉花科学, 2017, 39(3): 20-24.
- [24] 冯宝平, 张展羽, 张建丰, 等. 温度对土壤水分运动影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2002(5): 643-648.
- Feng Baoping, Zhang Zhanyu, Zhang Jianfeng, et al. Review of effect of temperature on soil water movement[J]. Advances in Water Science, 2002(5): 643-648. (in Chinese with English Abstract)
- [25] 张治, 田富强, 钟瑞森, 等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 44-51.
- Zhang Zhi, Tian Fuqiang, Zhong Ruisen, et al. Spatial and Temporal pattern of soil temperature in cotton field under mulched drip irrigation condition in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 44-51. (in Chinese with English Abstract)
- [26] 焦艳平, 康跃虎, 万书勤, 等. 干旱区盐碱地滴灌土壤基质势对土壤盐分分布的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 53-58.
- Jiao Yanpin, Kang Yuehu, Wan Shuqin, et al. Effect of soil matric potential on the distribution of soil salt under drip irrigation on saline and alkaline land in arid regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 53-58. (in Chinese with English Abstract)
- [27] Minhas P S. Saline water management for irrigation in India[J]. Agricultural Water Management, 1996, 30(1): 1-24.
- [28] 陈震, 车宗贤, 张久东, 等. 肥料酸化对灌漠土 pH 的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1478-1487.
- Chen Zhen, Che Zongxian, Zhang Jiudong, et al. Effects of fertilizer acidification on the soil pH of irrigated desert soil[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1478-1487. (in Chinese with English Abstract)
- [29] 刘新永, 田长彦. 棉花膜下滴灌盐分动态及平衡研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 82-85.
- Liu Xinyong, Tian Changyan. Study on dynamic and balance of salt for cotton under plastic mulch in south Xinjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 82-85. (in Chinese with English Abstract)
- [30] Palacios-Díaz M P, Mendoza-Grimón V, Fernández-Vera J R, et al. Subsurface drip irrigation and reclaimed water quality effects on phosphorus and salinity distribution and forage production[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(11): 1659-1666.
- [31] 牟洪臣, 虎胆·吐马尔白, 苏里坦, 等. 干旱地区棉田膜下滴灌盐分运移规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 18-22.
- Mou Hongchen, Hudan Tumaerbai, Su Litan, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under mulch in arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 18-22. (in Chinese with English Abstract)
- [32] 郑建华. 西北内陆旱区经济作物节水响应机理及灌溉制度优化模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- Zheng Jianhua. Response of Crop Growth to Water Saving Practices and Optimizing of Irrigation Scheduling in Arid Region of Northwest China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese with English Abstract)
- [33] 吴曦, 陈明昌, 杨治平. 碱性土壤施硫磺对油菜生长、土壤 pH 和有效磷含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 671-677.
- Wu Xi, Chen Mingchang, Yang Zhiping. Effects of sulfur application on the growth of cole, soil pH and available P in alkaline soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 671-677. (in Chinese with English abstract)
- [34] 万书勤, 康跃虎, 王丹, 等. 微咸水滴灌对黄瓜产量及灌溉水利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 30-35.
- Wan Shuqin, Kang Yuehu, Wang Dan, et al. Effects of saline water on cucumber yields and irrigation water use efficiency under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 30-35. (in Chinese with English abstract)

Yield of non-film cotton and the response of temperature, humidity and salt in the root zone to irrigation

Li Junhong¹, Wang Jun², Li Nannan¹, Hao Xianzhe², Shi Xiaojuan¹, Tian Yu¹, Shi Feng¹, Luo Honghai^{1*},
Yang Guozheng³

(1. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, 832003 China; 2. Shihezi Experimental Station for Efficient Water Use in Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi, 832003 China; 3. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Plastic-film pollution is the limiting factor for the efficient and sustainable development of cotton in Xinjiang in western China. This study aims to explore the mechanism of non-film cotton, moisture, temperature and salt concentration in the root zone under the deep and night irrigation for the future cotton production. An experiment was carried out at the Scientific Observation and Experimental Station of Crop Water Efficient Water Use (Shihezi) (45°38'N, 86°09'E) of the Ministry of Agriculture from 2019 to 2020. The total amount of precipitation during the cotton growth period in 2019 was higher than that in 2020. The daily average maximum and minimum temperatures were both lower than that in 2020. Under the condition of equal row spacing and high density planting (26 plants/m²), the early-maturing land cotton variety 'Xinluzao 74' was used as a test material (the growth period was 120 d). 5 irrigation water treatments (W₁, 2 649 m³/hm²; W₂, 2 925 m³/hm²; W₃, 3 201 m³/hm²; W₄, 3 477 m³/hm²; W₅, 3 753 m³/hm²) were set up (Among them, W₁₋₃ treatment was the average drip volume of underground drip irrigation, and W₄₋₅ treatment was the average drip volume of field film mulching water-saving drip irrigation). Some parameters were evaluated, including the formation of cotton yield, and the change of moisture, temperature and salt concentration in the root zones. The results showed that the seed cotton yield in 2020 increased by 45.6%-65.5%, compared with 2019 ($P<0.05$). W₄ treatment was higher with 4.1%-10.3% increment, compared with other treatments ($P<0.05$). The total number of bolls per unit area and the weight of a single boll increased by 4.2%-11.4% and 2.2%-4.1% in W₄ treatment, compared with other treatments ($P<0.05$). Soil water content was ranked in order of W₅ (W₄, W₃, W₂) before the full flowering period > W₁. There was no significant difference between the treatments after the full flowering period, but 21.2%-35.0% lower than that before the full flowering period ($P<0.05$). The soil temperature of W₄ treatment was 0.4%-1.3% and 0.4%-2.4% higher than other treatments at 0-55 and 95-135 d after sowing, respectively ($P>0.05$). The soil pH was lower in the W₄ treatment; The soil electrical conductivity was 6.4% to 19.4% higher than other treatments in the 0-30 cm soil layer under W₃ treatment ($P<0.05$). The correlation analysis showed that the seed cotton yield was significantly positively correlated with the soil conductivity at 10 cm, but significantly negatively correlated with pH ($P<0.05$); it was significantly positively correlated with 20 cm soil conductivity and soil water content during flowering. It was significantly negatively correlated with temperature and pH in the late period of the boll ($P<0.05$). Accordingly, an irrigation volume of 3 477 m³/hm² can be expected to create a suitable temperature and salt environment in the root zone (especially >10-20 cm soil layer) for cotton growth under the condition of no-film high-density deep layer and night drip irrigation. As such, the yield can be up to 4 873 kg/hm², indicating the high goal of efficient production in filmless cotton.

Keywords: soils; irrigation; subsurface drip irrigation; cotton; yield