

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.023

基于作物耗水特性的夹砂地膜下滴灌模式优选

周立峰¹ 吴淑芳¹ 齐智娟² 张体彬²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 在 2 个灌水水平下 (I1: 高水, I2: 低水) 以不同滴灌带间距 (A1: 1 m, A2: 0.5 m) 与覆膜方式 (M1: 全膜覆盖, M2: 半膜覆盖) 进行 2 a 田间试验, 结合作物产量、作物水分利用效率 (WUE) 以及产投比筛选适宜的膜下滴灌模式, 并利用产量水分敏感系数 (k_y) 确定最优的膜下滴灌模式。结果表明: 在低频灌溉模式下, 部分覆膜处理的蒸腾 (ET) 高于全覆膜处理, 而产量和 WUE 低于全覆膜处理。尽管滴灌带间距对 ET 的影响不明显, 然而在高水处理下, “一管单行”作物的产量与 WUE 高于“一管双行”。高频灌溉模式下, 作物产量及 WUE 对灌溉量、覆膜方式、滴灌带间距的响应呈现耦合性。低频灌溉条件下, k_y 对灌溉量及滴灌带间距的响应均不显著, 而部分覆盖处理 WUE 低, k_y 高, 对水分胁迫的响应敏感。高频灌溉条件下, 覆膜方式、灌溉量以及滴灌带间距均对 k_y 产生影响。高频灌溉条件下, k_y 能对经 WUE 筛选出的膜下滴灌处理进行进一步的优选。基于 k_y 的结果, 结合产量、水分利用效率与产投比, 建议在高频灌溉条件下采取“全膜低水 + 一管双行”模式或“半膜高水 + 一管单行”模式, 在低频灌溉条件下采取全膜高水模式。

关键词: 耗水; 灌溉频率; 滴灌带间距; 水分利用效率; 作物水分生产函数; 膜下滴灌

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)09-0183-08

Optimal Mode Selection of Mulched Drip Irrigation in Sand Layered Field Based on Water Consumption Characteristics

ZHOU Lifeng¹ WU Shufang¹ QI Zhijuan² ZHANG Tibin²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Judgement of crop water requirement just by soil water content is not competent, which is closely related with crop yields and water use efficiency. Corn water consumption and yield in response to mulching method (M1: fully mulched and M2: partially mulched), and irrigation amounts (I1 and I2) under variable drip irrigation lateral spacings (A1: 1 m and A2: 0.5 m) were investigated over two growing seasons in the Hetao Irrigation District under arid growing conditions. Results showed that evapotranspiration (ET) in partially mulched treatments were higher than that in treatments with full mulch cover under low irrigation frequency. However, the yields and water use efficiency (WUE) were lower under partial mulched treatments compared with full mulch. Closer lateral spacing had no effect on ET under low irrigation frequency, but yield was increased with high irrigation amount under low irrigation frequency. The yield response factor (k_y) of the crop water production function (CWPF) was sensitive to mulching method and it was lower in partially mulched treatments than in fully mulched treatments under low irrigation frequency. Under high irrigation frequency, k_y was sensitive to irrigation amounts, mulching methods and lateral spacing. The CWPF along with WUE and crop yield can aid in the selection of optimal irrigation and mulching management. Considering k_y , yield, WUE and costs,

收稿日期: 2017-01-13 修回日期: 2017-02-07
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA102904)、中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306-1)和高等学校学科创新引智计划(111 计划)项目(B12007)
作者简介: 周立峰(1986—),男,博士生,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: lee86208@126.com
通信作者: 吴淑芳(1977—),女,副研究员,博士生导师,主要从事水土资源高效利用研究,E-mail: wsfjs@163.com

partial mulch with 1 m lateral spacing under high irrigation amount and full mulch with 0.5 m lateral spacing with low irrigation amount was optimal under high irrigation frequency while either 1 m or 0.5 m lateral spacing under partial mulch with low irrigation amount was optimal under low irrigation frequency, respectively. This study can guide irrigation application for maize in the Hetao Irrigation District.

Key words: water consumption; irrigation frequency; lateral spacing; water use efficiency; crop water production function; mulched drip irrigation

引言

膜下滴灌研究目前大多围绕滴灌带间距、滴头流量以及灌水频率^[1-3]对土壤湿润体及作物根系水分的供给而展开^[4-5]。然而,作物生长前期土壤水分的充分供给可能会造成作物冠根比过高,导致根冠水分供需矛盾^[6]。因此,膜下滴灌方式下的作物耗水研究也应当引起关注。

作物水分利用效率(WUE)是评价作物耗水与产量关系常用的指标^[7]。然而,大量试验表明 WUE 高值一般不是在供水充足、产量(Y)最高时获得,蒸散量(ET)与产量乃至 WUE 的关系并非总是呈线性关系^[2,8-9]。作物水分生产函数(CWPF)可以较充分揭示 WUE-Y-ET 间的内在联系并对 WUE-ET 间的边际效应关系进行描述^[10]。CWPF 有多种表达形式:作物产量可表示为经济产量或干物质量,水量可以用作物蒸发蒸腾量、作物蒸腾量、灌溉水量及可利用水量等表达,目前研究多以 Y-ET 曲线为主^[11]。Y-ET 型 CWPF 可以分为 2 类:一类是产量与全生育期腾发量的关系,如 Steward 函数^[12];一类是产量与全生育期各阶段腾发量之间的关系,如 Jensen 函数^[13]、Bras and Corodova 函数^[14]。第一类函数主要描述农田供水状况与作物产量的经验关系,称为最终产量型 CWPF,适用于灌溉规划优选;第二类函数着重分析作物生长与水分供应的关系,具有机理性及连续动态特征,称为动态产量型

CWPF,在农业用水管理过程中被广泛运用^[15]。

当前的 CWPF 研究多见于动态产量型 CWPF,用于在非充分灌溉控制试验中确定高效的农业水管理方案^[16-17],并且联合各生育期水分亏缺敏感指数实现对作物产量的预测^[18]。近年来,EL-HENDAWY等^[2]使用最终产量型 CWPF 确定了砂地滴灌玉米最佳滴灌频率与灌水量的组合,在一定程度上拓展了最终产量型 CWPF 的使用。本文在内蒙古河套地区设置了 2 种覆膜方式下的膜下滴灌模式(不同滴灌带间距及灌水量),研究不同膜下滴灌模式下的 WUE 以及 CWPF 的产量反应系数(k_y ,又称产量水分敏感系数),旨在通过比较不同膜下滴灌模式下产量对灌水量的响应敏感度,并结合产投比最终选择出适合当地的膜下滴灌模式。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验于 2014—2015 年在内蒙古河套灌区曙光试验站进行(107°13'E、40°43'N,海拔高度 1 042 m)。该地区属中温带干旱气候,多年平均降水量 135 mm,蒸发量超过 2 306.5 mm,年均气温 9.1℃。该地区降水集中在 6—9 月份,无霜期 135~150 d,年日照时数 3 100~3 300 h。2 a 试验期间春玉米全生育期平均温度分别为 19.91℃和 20.22℃;总降水量分别为 84 mm 和 14.62 mm。试验地土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验地土壤(0~120 cm)基本理化性质
Tab.1 Physical and chemical properties of soil (0~120 cm) in experimental site

土层深度/ cm	容重/ (g·cm ⁻³)	田间持水 量/%	电导率/ (mS·cm ⁻¹)	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ 质量比/ (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ 质量比/ (mg·kg ⁻¹)	土壤粒径(质量分数)/%		
							0~0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm
0~20	1.4	29.4	0.3	7.3	7.9	8.0	20.0	47.8	32.2
20~40	1.4	31.9	0.3	6.7	5.7	13.8	23.0	53.8	23.2
40~60	1.4	30.8	0.3	6.3	3.5	5.4	23.1	47.2	29.7
60~90	1.5	17.5	0.2	3.0	1.4	3.1	2.0	3.7	94.3
90~120	1.4	31.3	0.3	5.3	3.8	6.2	15.3	35.4	49.3

1.2 试验设计方法及方法

试验设置全膜(M1)与半膜(M2)2种覆膜方式。每种覆膜方式下设 2 个灌水水平(I1、I2)与 2 个滴灌带间距(A1、A2),共计 8 个处理,每个处理

设 3 个重复。小区尺寸 4 m×8 m,各小区随机排列。I2 的灌水量为 I1 的 60%。A1 处理滴灌带间距为 1 m, A2 处理滴灌带间距为 0.5 m。A1 处理采取宽窄行种植,宽行 70 cm,窄行 30 cm,滴灌带位

于 2 行玉米中间,为“一管双行”控制;A2 处理采取等行距种植,行距 0.5 m,为“一管单行”控制。“一管双行”与“一管单行”的半膜处理覆盖度(地膜覆盖面积与试验区之比)均为 0.6,地膜宽度分别为 60 cm 与 30 cm。各小区装有水表、压力计以控制灌水量及滴头流量,试验所用贴片式滴灌带($\phi=16$ mm)滴头间距为 30 cm,设计滴头流量 1.4 L/h。

2014 年采取低频灌溉模式^[19],作物发生较严重的水分胁迫。基于此,本研究在 2015 年采取了高频灌溉模式。播后灌水及施肥措施见表 2。2014 年

为低频节水灌溉模式:I1 的灌水量为 180 mm(当地畦灌灌水量的 60%),灌溉时间与当地畦灌灌溉时间保持一致;2015 年为高频充分灌溉:自拔节期开始依据 20 cm 直径蒸发皿(E_{20})日蒸发数据确定单次灌水量^[20],每 3 d 灌水一次,整个生育期灌水量为 346.1 mm。2 年的施肥水平均为 N 300 kg/hm²和 P₂O₅ 420 kg/hm²。P₂O₅(磷酸氢二铵)以底肥的形式全部施入土壤。N(尿素与磷酸氢二铵)按照 N 150 kg/hm²的水平于播种前施入,其余 N(150 kg/hm²)以尿素的形式于玉米 6 叶期后以滴灌施肥的形式多次施入。

表 2 膜下滴灌各处理灌水量和施肥量

Tab.2 Application amount of water and nitrogen of mulched drip irrigation

处理	2014 年				2015 年			
	灌水量/mm	灌水次数	施 N 量/(kg·hm ⁻²)	施 N 次数	灌水量/mm	灌水次数	施 N 量/(kg·hm ⁻²)	施 N 次数
I1	180	9	300	5	346	20	300	17
I2	108	9	300	5	208	20	300	17

小区分别于 2014 年 4 月 22 日、2015 年 4 月 26 日覆膜,覆膜 2 d 后播种。供试春玉米品种为“西蒙 6 号”。播种方式为人工点播,播种深度为 5 cm,播种密度为 66 600 株/hm²。作物生长期采取除草、喷药等其他常规管理措施。

1.3 取样及测定方法

1.3.1 土壤含水率

采用烘干法测量土壤质量含水率。水平方向上,取样点分别设置在滴头处,相邻滴头间 1/4 处及 1/2 处;垂直取样深度为 10、30、50 cm 处。此外,为了判断是否在灌水或降水后发生土壤水分的深层渗漏,在高水处理(I1)采用 ECH2O-5TE 型(Decagon Devices, Inc., USA)土壤水热监测系统进行土壤水分的实时监测,使用烘干法的土壤含水率数据对探头进行校准。土壤含水率的监测贯穿春玉米整个生育期,数据采集时间步长为 1 h。

1.3.2 产量

蜡熟期后选取各小区中间 2 行玉米进行测产。玉米脱粒后数取粒数,放置室外晒 4~5 d,称取质量并换算成每公顷产量,产量依照称取质量的 15% 扣除水分。

1.3.3 玉米耗水量

采用水量平衡法计算玉米耗水量 ET (mm)

$$ET = \Delta W + P + I + G + R + D \tag{1}$$

式中 ΔW ——播种期与收获期根区土壤储水量变化量,mm
 P ——生育期有效降水量,mm
 I ——玉米生育期灌水量,mm

R ——生育期地表径流量,mm
 D ——生育期根区深层渗漏量,mm
 G ——生育期地下水对作物根系补给量,mm

本研究砂层出现在 60 cm 处,故根区土壤选取土表至 60 cm 深度处,运移至 60 cm 以下的水分视为深层渗漏。本试验各处理均为膜下滴灌且试验区地势平坦,故无地表径流产生。根据 FAO 56 分册中提供的方法计算,假定降水或灌溉补给根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^[21]。当细沙的层位(砂层下表面高于地下水位的距离)大于 35 cm 后,毛管水会停留在砂层中无法上升从而阻断沙层上下土层的水力联系,本研究砂层的层位为 1 m,故忽略地下水补给。

1.3.4 作物水分利用效率及水分生产函数

春玉米水分利用效率(Water use efficiency, WUE, kg/(hm²·mm))计算公式为

$$WUE = \frac{Y}{ET} \tag{2}$$

式中 Y ——单位面积玉米产量,kg/hm²
作物水分生产函数^[2]表达式为

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = k_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right) \tag{3}$$

式中 ET_a ——作物实际蒸发蒸腾量
 ET_m ——作物最大蒸发蒸腾量
 Y_a ——作物实际产量
 Y_m ——作物最高产量
 k_y ——作物产量反应系数

1.3.5 经济效益

本研究以产投比作为经济效益评价指标。膜下滴灌春玉米的生产投入主要包括:贴片式滴灌带、地膜、种子、化肥、农药等农业生产资料费用以及水、电费和人工费等。农资及水电成本根据单价与使用量计算,人工成本主要包括播前整地、布置滴灌设备、覆膜、播种、喷施农药、收获及移除滴灌设备等。收入主要来源于玉米籽粒收入。单位面积籽粒销售收入与生产投入之比即为产投比。

利用 LSD 法进行处理间多重比较, $P < 0.05$ 则视为存在明显差异。分析工具采用 SPSS 15.0。

2 结果与分析

2.1 不同膜下滴灌方式对春玉米蒸腾量的影响

根据 EM50 连续监测的土壤含水率数据可知,砂层上的含水率未出现整体超过田间持水量的情况,可以认为 2 a 试验过程中均未发生土壤水分向沙层下渗漏。各处理的 ET 见表 3。2014 年采用低频灌溉模式,滴灌带间距对 ET 影响不显著,而灌溉量与覆膜方式是影响该年 ET 的主要因素。这主要是因为灌溉频率低削弱了滴灌带间距对土壤水分的影响。高水处理下,覆膜方式对 ET 无明显影响。全膜覆盖处理虽然减少了土面蒸发,然而其作物生长相比较半膜更加旺盛,造成其作物蒸腾强度更高^[22]。此外,全膜覆盖阻断了降水对土壤水分的补给,而 2014 年玉米生育期降水量为 84 mm,降水因素不可忽略。上述三者共同作用致使高水处理下覆膜方式对 ET 无明显的影响。而在低水处理下,半膜覆盖处理的 ET 高于全覆膜处理。本试验中,半膜覆盖土壤表层湿润体半径小于 25 cm,无法到达膜外,土面蒸发占 ET 的比例不大。相反,全膜覆盖春玉米叶面积在生殖生长期下降较快,从而使得作物蒸腾在该时期较弱^[6],最终导致 ET 低于半膜覆盖处理。由表 3 还可看出在低频灌溉条件下,全膜覆盖下各处理玉米生育期土壤水分消耗差异不大,而半膜覆盖低灌溉处理的土壤水分消耗显著增大,这也佐证了上述分析。2015 年采取了高频灌溉模式,灌水量与滴灌带间距对 ET 影响显著,而覆膜方式对 ET 的影响不大。灌溉模式的改变增强了与其直接相关的灌水量与滴灌带间距对 ET 的影响,而削弱了覆膜方式对 ET 的影响。灌溉量的减小与滴灌带间距的缩小均会降低 ET 。缩小滴灌带间距会使根区土壤横向分布均匀^[4],从而更好地满足作物耗水需求,最终导致 ET 较高。值得注意的是,滴灌带间距小的处理土壤含水率变化量小,这表明较小的滴灌带间距可以提高根层土壤水分用于蒸腾的利

表 3 不同膜下滴灌方式下春玉米蒸腾量(ET)
Tab.3 Maize evapotranspiration of various treatments in 2014 and 2015 mm

年份	处理		灌水量	降水量	土壤储水量 变化量	<i>ET</i>	
2014	M1	I1	A1	180.0	82.6	28.3 ^c	281.9 ^{ab}
			A2	180.0	82.6	53.3 ^b	315.9 ^a
		I2	A1	108.0	82.6	36.0 ^{bc}	226.6 ^c
			A2	108.0	82.6	40.1 ^{bc}	230.7 ^c
	M2	I1	A1	180.0	82.6	39.7 ^{bc}	302.3 ^a
			A2	180.0	82.6	40.7 ^{bc}	303.3 ^a
		I2	A1	108.0	82.6	71.8 ^a	262.4 ^b
			A2	108.0	82.6	68.8 ^{ab}	259.4 ^b
2015	M1	I1	A1	346.1	13.3	59.6 ^a	419.0 ^a
			A2	346.1	13.3	8.2 ^d	367.6 ^b
		I2	A1	207.7	13.3	39.7 ^b	260.7 ^c
			A2	207.7	13.3	44.6 ^b	265.6 ^c
	M2	I1	A1	346.1	13.3	33.8 ^{bc}	393.2 ^a
			A2	346.1	13.3	0.5 ^d	359.9 ^b
		I2	A1	207.7	13.3	58.7 ^a	279.7 ^c
			A2	207.7	13.3	27.6 ^c	248.6 ^c

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

用效率。
2.2 不同膜下滴灌方式对春玉米产量、水分利用效率及产投比的影响

各处理的产量、水分利用效率(WUE)及产投比见表 4。在低频灌溉模式下,高水处理能显著提高作物产量与 WUE,而全膜处理则能明显提高 WUE。全膜处理一方面增加了产量,另一方面减少了 ET ,因此提高了 WUE。滴灌带间距在高水处理下显著影响作物产量与 WUE:“一管单行”作物的产量与 WUE 较高。值得注意的是,在高频灌溉模式下,作物产量及 WUE 对灌溉量、覆膜方式、滴灌带间距的响应呈现耦合性:M1I1A1 处理产量最高,然而 WUE 较低;M1I2A2、M2I2A1 处理产量最低,然而 WUE 较高。在所有的处理中,M1I2A1、M1I1A2、M2I1A2 处理能同时获得较高的作物产量与 WUE。

由产投比可看出,2014 年滴灌带布置距离与覆膜方式对产投比影响不显著,而低水处理产投比(1.3~1.9)明显低于高水处理(2.1~2.7)(表 4)。这说明低频灌溉模式下过低的灌溉量会明显降低覆膜及滴灌设备的效益^[23]。这主要因为与灌溉相关的水、电费在 2014 年占比较低(5%~12%,表 5),但其对产量的提高作用显著。2015 年,灌溉量与覆膜方式对产投比的影响不大,而较小的滴灌带间距降低了产投比(表 4)。这主要是因为 2015 年各处理产量差异不大,但减小滴灌带间距则加大了滴灌设备的投入(表 5)。

表 4 不同膜下滴灌方式下春玉米产量、水分利用效率及产投比

Tab.4 Grain yield, water use efficiency and ratio of output to input under various mulched drip irrigation treatments								
处理			产量/(kg·hm ⁻²)		水分利用效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)		产投比	
			2014 年	2015 年	2014 年	2015 年	2014 年	2015 年
M1	I1	A1	14720.6 ^b	17 530.3 ^a	52.2 ^{ab}	41.8 ^c	2.7 ^a	2.9 ^a
		A2	17 976.1 ^a	16 486.9 ^{ab}	56.9 ^a	44.9 ^{bc}	2.7 ^a	2.3 ^{ab}
	I2	A1	9 762.9 ^c	16 295.6 ^{ab}	43.1 ^b	62.5 ^a	1.9 ^b	3.0 ^a
		A2	10 078.3 ^c	14 213.1 ^c	43.7 ^b	53.5 ^b	1.6 ^b	2.1 ^b
M2	I1	A1	11 686.7 ^d	16 444.4 ^{ab}	38.7 ^{bc}	41.8 ^c	2.3 ^a	2.9 ^a
		A2	13 373.2 ^c	17 182.8 ^a	44.1 ^b	47.7 ^{bc}	2.1 ^{ab}	2.5 ^{ab}
	I2	A1	9 072.9 ^{ef}	14 911.3 ^{bc}	34.6 ^c	53.3 ^b	1.9 ^b	2.9 ^a
		A2	8 171.7 ^f	10 486.8 ^d	31.5 ^c	42.2 ^c	1.3 ^c	1.6 ^c

表 5 不同处理下的成本支出 (2014—2015)

Tab.5 Cost of all treatments during 2014—2015										元/hm ²		
年份	处理		滴灌带	地膜	种子	化肥	农药	水费	电费	人工费	总投入	
2014	M1	I1	A1	1 500	1 600	825	1 730	1 800	360	1 012	3 000	11 827
			A2	3 000	1 600	825	1 730	1 800	360	1 012	4 200	14 527
		I2	A1	1 500	1 600	825	1 730	1 800	216	608	3 000	11 279
			A2	3 000	1 600	825	1 730	1 800	216	608	4 200	13 979
	M2	I1	A1	1 500	960	825	1 730	1 800	360	1 012	3 000	11 187
			A2	3 000	960	825	1 730	1 800	360	1 012	4 200	13 887
		I2	A1	1 500	960	825	1 730	1 800	216	608	3 000	10 639
			A2	3 000	960	825	1 730	1 800	216	608	4 200	13 339
2015	M1	I1	A1	1 500	1 600	825	1 730	1 800	692	1 945	3 000	13 092
			A2	3 000	1 600	825	1 730	1 800	692	1 945	4 200	15 792
		I2	A1	1 500	1 600	825	1 730	1 800	415	1 167	3 000	12 037
			A2	3 000	1 600	825	1 730	1 800	415	1 167	4 200	14 737
	M2	I1	A1	1 500	960	825	1 730	1 800	692	1 945	3 000	12 452
			A2	3 000	960	825	1 730	1 800	692	1 945	4 200	15 152
		I2	A1	1 500	960	825	1 730	1 800	415	1 167	3 000	11 397
			A2	3 000	960	825	1 730	1 800	415	1 167	4 200	14 097

2.3 不同膜下滴灌方式下春玉米作物水分生产函数

作物产量、WUE 以及产投比可以实现膜下滴灌模式初步筛选。然而,对筛选结果的分析以及最终的确定还需从作物需水的角度去阐述。作物需水的情况可以用作物水分生产函数的 k_y 值进行描述(图 1)。

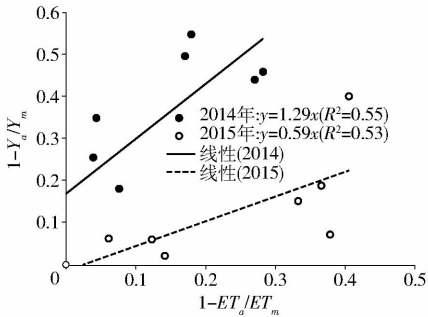


图 1 2014 年和 2015 年春玉米产量对 ET 的反应系数
Fig.1 Yield response factor (k_y) of spring maize in 2014 and 2015 growing seasons

作物在关键需水期遭受水分胁迫会造成 k_y 值变高^[24]。由表 6 可知,低频灌溉模式下(2014 年),

k_y 值降低与 WUE 升高反映出一致的结果:半膜覆盖处理的 k_y 值(2.92 ~ 8.13)高于全膜覆盖处理(1.62 ~ 2.38),而 WUE 低于全膜覆盖处理(表 4)。这表明低频灌溉条件下,半膜覆盖的 k_y 值对滴灌带间距的响应不显著,而全膜覆盖的 k_y 值对灌水量及滴灌带间距的响应均不显著。这表明相比半膜覆盖,全膜覆盖可以降低灌溉不足对玉米的水分胁迫。该年度灌水量的增加主要是通过提高单次灌水量实现,而过高的单次灌水量会造成在水沙界面(60 cm 处)形成水分阻滞,造成该层土壤含水率高^[25],这对减少作物生育期的水分胁迫作用不大。滴灌带间距对 k_y 影响不显著主要是因为灌溉频率低造成滴灌带间距对 ET 的影响较小(表 3)。在 2015 年,与低频灌溉条件下不同的是,本研究涉及到的 3 个因素均对 k_y 值产生了影响。M2I1A1 与 M2I2A2 处理 k_y 值较高,分别为 1.01 与 0.99,其他处理的 k_y 值均较低。这说明在高频灌溉条件下,半膜覆盖处理要注意灌水量与滴灌带间距的组合,不宜采用“高灌水量 +

一管双行”或“低灌水量 + 一管单行”的模式。

表 6 不同膜下滴灌方式下的 k_y 值
Tab. 6 Yield response factor (k_y) for various mulched irrigation methods

处理		2014 年	2015 年
M1	I1	A1	1. 68
		A2	/
	I2	A1	0. 49
		A2	0. 19
M2	I1	A1	1. 62
		A2	0. 52
	I2	A1	8. 13
		A2	1. 01
		A1	0. 14
		A2	0. 45
		A1	0. 99
		A2	0. 45

注:“/”表示最高 ET 及产量出现在该处理。

3 讨论

国内外研究表明,减小滴灌带间距能提高根区土壤的湿润比,从而提高作物生育期的耗水量^[1, 26]。本研究表明滴灌带间距对作物耗水的提高作用受灌溉频率和灌溉量组合的影响。过低的灌溉频率和灌溉量会削弱滴灌带间距对土壤水分的影响,从而弱化滴灌带间距对作物 ET 的影响。在高频灌溉模式下,滴灌带间距对 ET 的影响显著,而覆膜方式对 ET 的影响不大。之前的研究表明减小滴灌带间距会使根区土壤水分横向分布均匀^[4],从而更好地满足作物耗水需求,最终导致 ET 较高。然而,本研究表明在高频充分灌溉条件下,滴灌带间距的减小反而会降低 ET ,这与之前的研究结果^[1, 25]不同。这主要是因为“一管单行”处理的根区土壤水分分布均匀度更高^[26],作物根系可以更高效地利用根区土壤水分,从而导致收获前后土壤含水率变化量小,最终造成 ET 值较低。膜下滴灌条件下,覆膜对 ET 的影响是通过减少土面蒸发、改变降水入渗与影响作物蒸腾三者共同决定的。低频灌溉模式下,高水处理半膜覆盖与全膜覆盖的 ET 虽然无显著差异,这是土面蒸发抑制、降水截留与作物蒸腾加剧共同作用的结果。全膜覆盖处理虽然减少了土面蒸发,然而其作物生长相比较半膜覆盖更加旺盛,造成其作物蒸腾强度更高。此外,全膜覆盖阻断了降水对土壤水分的补给,而 2014 年玉米生育期降水量为 84 mm,降水因素不可忽略。上述三者共同作用致使高水处理下覆膜方式对 ET 无明显的影响。而在低水处理下,半膜覆盖处理的 ET 高于全膜覆盖处理。本试验中,半膜覆盖土壤表层湿润体半径小于 25 cm,无法到达膜外,土面蒸发占 ET 的比例不大。相反,全膜覆盖处理春玉米叶面积在生殖生长期下降较快,从而使得作物蒸腾在该时期较弱^[6],

最终导致 ET 低于半膜覆盖处理。同理,在高频灌溉模式下,与灌溉量的差异相比,覆膜方式对土面蒸发、降雨截留与作物蒸腾的改变对 ET 的影响不大。

前期研究表明优化灌水量与灌水频率的组合可以提高作物产量^[2]。与作物生育期耗水结果类似,适宜的灌水量与灌水频率组合能突出滴灌带间距对作物产量的影响。这主要是因为灌水量、灌溉频率以及滴灌带间距对土壤湿润比以及湿润体内部的水氮分布具有耦合作用,而湿润体内的水氮分布会进一步影响作物根冠生长及干物质转移,最终影响作物产量^[18]。

低频灌溉模式下,全膜覆盖 ET 低于半膜覆盖,然而较高的产量导致了全膜覆盖具有较高的 WUE,这与前人^[27]的结果相似。尽管滴灌带间距对 ET 的影响不明显,然而在高水处理下,“一管单行”作物的 WUE 高于“一管双行”。低水处理虽然水分亏缺明显(通过土壤含水率判断),但“一管双行”处理灌水相对集中于滴灌带两侧,从而能使更多水分分布于作物种植窄行,进而在作物根区形成“干湿区”,使作物根系产生大量的根毛来尽量满足作物蒸腾需要^[28]。相反,“一管单行”处理水平方向灌水均匀,在单次灌水量高时能较好地满足作物根区土壤水分需求,体现出相对于“一管双行”的优势。然而在低水处理情况下“一管单行”湿润深度过浅(小于 30 cm),反而不利于作物对土壤水分的吸收。

高频灌溉模式下,作物产量及 WUE 对灌水量、覆膜方式、滴灌带间距的响应呈现耦合性:M1I1A1 处理产量最高,然而 WUE 较低;M1I2A2、M2I2A1 处理产量最低,然而 WUE 较高。充足的水分供给带来较高的产量,但是 WUE 却不是最高的,这与之前的试验结果类似^[10]。在所有的处理中,M1I2A1、M1I1A2、M2I1A2 处理能同时获得较高的作物产量与 WUE。虽然各因素设置的水平只有 2 个,但是因素相互间对产量及 WUE 的耦合效应还是明显的。各处理的产投比主要受与灌溉相关的水、电费以及与滴灌带间距相关的滴灌设备投入影响,高水处理与“一管单行”处理投入较高。综合产量、WUE 以及产投比,低频灌溉条件下 M1I1A2 或 M1I1A1 处理较为合理;高频灌溉下 M1I2A1、M2I2A1 与 M2I1A2 处理较为合理。

国内外研究表明 k_y 值在不同地区、不同气候以及不同水分管理方式下变幅很大(0.5 ~ 1.6)^[24, 29-31],本研究 2015 年由于根据潜在蒸发量采取了充分灌溉,故 k_y 值(0.14 ~ 1.01)明显低于 2014 年(1.62 ~ 8.13)。这表明 CWPF 可以准确地反映各处理作物对 ET 及水分胁迫的响应并可用于

膜下滴灌的优选。尽管提高单次灌水量可以降低 k_y 值,然而,2014 年高水处理的单次灌水量已经超过 30 mm,再增加单次灌水量可能在夹砂地引起明显的水分渗漏,因此在夹砂地应优先采用高频灌溉的方式。此外,虽然从作物产量、WUE 以及产投比的角度看,高频灌溉下 M1I2A1、M2I2A1 与 M2I1A2 处理均较为合理,然而 M1I2A1 与 M2I1A2 的 k_y 值很低,分别为 0.19 和 0.14,表明这 2 个处理具有较大的节水潜力,可以进一步减少灌水量,提高灌水效率^[24]。基于以上 k_y 结果,结合产量、水分利用效率与产投比,建议在低频灌溉条件下采取 M1I1A1 或 M1I1A2 模式,在高频灌溉条件下采取 M1I2A1 或 M2I1A2 模式。

低频灌溉条件下, k_y 与 WUE 对作物耗水特性反应一致; k_y 值对灌水量及滴灌带间距的响应均不显著,而半膜覆盖处理 WUE 低, k_y 值高,对水分胁迫的响应敏感。高频灌溉条件下, k_y 值与 WUE 对作物耗水特性的反应不尽一致:覆膜方式、灌水量以及滴灌带间距均对 k_y 值产生影响。由于高频灌溉各处理产量与水分利用效率差异不大,故 k_y 值能发挥其优化的功能。基于 k_y 的结果,结合产量、水分利用效

率与产投比,建议在高频灌溉条件下采取 M1I2A1 或 M2I1A2 模式,当高频灌溉条件不具备时,可在低频灌溉条件下采取 M1I1A1 或 M1I1A2 模式。

4 结论

(1)灌溉量对 ET 的影响明显,高灌溉量处理的 ET 高于低灌溉量处理。在低频灌溉模式下,半膜覆盖处理的 ET 高于全覆膜处理,而产量与 WUE 低于全覆膜处理。尽管滴灌带间距对 ET 的影响不明显,然而在高水处理下,“一管单行”作物的产量与 WUE 高于“一管双行”。高频灌溉模式下,作物产量及 WUE 对灌溉量、覆膜方式、滴灌带间距的响应呈现耦合性。

(2)低频灌溉条件下, k_y 值对灌溉量及滴灌带间距的响应均不显著,而部分覆盖处理 WUE 低, k_y 值高,对水分胁迫的响应敏感。高频灌溉条件下,覆膜方式、灌溉量以及滴灌带间距均对 k_y 值产生影响。基于 k_y 的结果,结合产量、水分利用效率与滴灌设备成本,建议在高频灌溉条件下采取 M1I2A1 或 M2I1A2 模式,当高频灌溉条件不具备时,可在低频灌溉条件下采取 M1I1A1 或 M1I1A2 模式。

参 考 文 献

- 1 蔡焕杰,邵光成,张振华. 棉花膜下滴灌毛管布置方式的试验研究[J]. 农业工程学报,2002,18(1): 45-48.
CAI Huanjie, SHAO Guangcheng, ZHANG Zhenhua. Lateral layout of drip irrigation under plastic mulch for cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 45-48. (in Chinese)
- 2 EL-HENDAWY S E, SCHMIDHALTER U. Optimal coupling combinations between irrigation frequency and rate for drip-irrigated maize grown on sandy soil[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(3): 439-448.
- 3 LI Jiusheng, ZHANG Jianjun, RAO Minjie. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(2): 89-104.
- 4 李明思,康绍忠,杨海梅. 地膜覆盖对滴灌土壤湿润区及棉花耗水与生长的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(6): 49-54.
LI Mingsi, KANG Shaozhong, YANG Haimei. Effects of plastic film mulch on the soil wetting pattern, water consumption and growth of cotton under drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 49-54. (in Chinese)
- 5 胡晓棠,陈虎,王静,等. 不同土壤湿度对膜下滴灌棉花根系生长和分布的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(5):1682-1689.
HU Xiaotang, CHEN Hu, WANG Jing, et al. Effects of soil water content on cotton root growth and distribution under mulched drip irrigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(5): 1682-1689. (in Chinese)
- 6 李凤民,鄢珣,王俊,等. 地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理[J]. 中国农业科学,2001,34(3):330-333.
LI Fengmin, YAN Xun, WANG Jun, et al. The mechanism of yield decrease of spring wheat resulted from plastic film mulching[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(3): 330-333. (in Chinese)
- 7 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/OL]. 农业机械学报,2016, 47(5):155-163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160521&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.021.
FENG Hao, LIU Xiaoqing, ZUO Yiqiu, et al. Effect of gravel mulching degree on farmland moisture and water consumption features of crops[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 155-163. (in Chinese)
- 8 田建柯,张富仓,强生才,等. 灌水量及灌水频率对玉米生长和水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(9): 815-822.
TIAN Jianke, ZHANG Fucang, QIANG Shengcai, et al. Effects of irrigation level and frequency on growth and water use efficiency of maize[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(9): 815-822. (in Chinese)
- 9 解文艳,樊贵盛,周怀平,等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(11):60-67.
XIE Wenyan, FAN Guisheng, ZHOU Huaiping, et al. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 60-67. (in Chinese)
- 10 毛晓敏,尚松浩. 作物非充分灌溉制度优化的 0-1 规划模型建立与应用[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(10):153-158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141024&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.024.

- MAO Xiaomin, SHANG Songhao. Application of 0-1 programming model on optimization of crop deficit irrigation schedule[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 153-158. (in Chinese)
- 11 彭世彰,边立明,朱成立. 作物水分生产函数的研究与发展[J]. 水利水电科技进展,2000,20(1):17-20.
PENG Shizhang, BIAN Liming, ZHU Chengli. Research and development of crop-water production functions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000, 20(1):17-20. (in Chinese)
- 12 STEWART B A, MUSICK J T. Conjunctive use of rainfall and irrigation in semiarid regions[J]. Advance in Irrigation, 1982,1: 1-24.
- 13 JENSEN M E. Water consumption by agricultural plants[M]//KOZLOWSKI T T. Water deficits in plant growth. New York: Academic Press, 1968: 1-22.
- 14 BRAS R L, CORODOVA J R. Intra-seasonal water allocation in deficit irrigation[J]. Water Resource Research, 1981, 17(4): 886-874.
- 15 沈荣开,张瑜芳,黄冠华. 作物水分生产函数与农田非充分灌溉研究述评[J]. 水科学进展,1995,6(3):248-253.
SHEN Rongkai, ZHANG Yufang, HUANG Guanhua. A review of crop-water production functions and problem of irrigation with inadequate water supply[J]. Advances in Water Science, 1995, 6(3): 248-253. (in Chinese)
- 16 SINGH P, WOLKEWITZ H, KUMAR R. Comparative performance of different crop production functions for wheat[J]. Irrigation Science, 1987, 8(4): 273-290.
- 17 张振华,蔡焕杰,杨润亚. 基于作物水分生产函数和胁迫指数的棉花产量估算模式[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(12):135-138.
ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, YANG Runya. Cotton yield estimation model based on crop water production function and CWSI [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agricultural and Forest: Natual Science Edition, 2005, 33(12): 135-138. (in Chinese)
- 18 康绍忠,熊运章. 作物缺水状况的判别方法与灌水指标的研究[J]. 水利学报,1991,30(1):34-39.
KANG Shaozhong, XIONG Yunzhang. The judgment method of crop water deficit and irrigation index[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 30(1): 34-39. (in Chinese)
- 19 王建东,龚时宏,隋娟,等. 华北地区滴灌灌水频率对春玉米生长和农田土壤水热分布的影响[J]. 农业工程学报,2008, 24(2):39-45.
WANG Jiandong, GONG Shihong, SUI Juan, et al. Effects of drip irrigation frequency on the farmland soil water-heat distribution and spring maize growth in North China[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(2): 39-45. (in Chinese)
- 20 WANG Zikui, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Water use and crop coefficient of the wheat-maize strip intercropping system for an arid region in northwestern China[J]. Agricultural Water Management, 2015, 161(7): 77-85.
- 21 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- 22 谢军红,柴强,李玲玲,等. 黄土高原半干旱区不同覆膜连作玉米产量的水分承载时限研究[J]. 中国农业科学,2015, 48(8):1558-1568.
XIE Junhong, CHAI Qiang, LI Lingling, et al. The time loading limitation of continuous cropping maize yield under different plastic film mulching modes in semi-arid region of loess plateau of China[J]. Scientia Agricultura Sinica,2015, 48(8):1558-1568. (in Chinese)
- 23 王锐,孙权. 基于水肥一体化的酿酒葡萄高效栽培与效益分析[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):115-121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161016&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.016.
- WANG Rui, SUN Quan. High-efficiency cultivation and benefit analysis of wine grape based on fertigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 115-121. (in Chinese)
- 24 IGBADUN H E, TARIMO A K, SALIM B A, et al. Evaluation of selected crop water production functions for an irrigated maize crop[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1-3): 1-10.
- 25 王文焰,张建丰,汪志荣,等. 砂层在黄土中的减渗作用及其计算[J]. 水利学报,2005,36(6):650-655.
WANG Wenyan, ZHANG Jianfeng, WANG Zhirong, et al. Infiltration reduction effect of sand layer in loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 650-655. (in Chinese)
- 26 宰松梅,仵峰,温季,等. 大田地下滴灌土壤水分分布均匀度评价方法[J]. 农业工程学报,2009,25(12):51-57.
ZAI Songmei, WU Feng, WEN Ji, et al. Evaluation method of soil water distribution uniformity under conditions of field subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(12): 51-57. (in Chinese)
- 27 李尚中,王勇,樊廷录,等. 旱地玉米不同覆膜方式的水温及增产效应[J]. 中国农业科学,2010,43(5):922-931.
LI Shangzhong, WANG Yong, FAN Tinglu, et al. Effects of different plastic film mulching modes on soil moisture, temperature and yield of dryland maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(5): 922-931. (in Chinese)
- 28 胡田田,康绍忠,原丽娜,等. 不同灌溉方式对玉米根毛生长发育的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(6):1289-1295.
HU Tiantian, KANG Shaozhong, YUAN Li'na, et al. Effects of different irrigation patterns on the growth of maize root hair[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6):1289-1295. (in Chinese)
- 29 RETTA A, HANKS R J. Corn and alfalfa production as influenced by limited irrigation[J]. Irrigation Science, 1980, 1(3): 135-147.
- 30 HOWELL T A, SCHNEIDER A D, EVETT S R. Subsurface and surface micro irrigation of maize—Southern High Plains[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 38(3): 745-759.
- 31 POPOVA Z, ENEVA S, PEREIRA L S. Model validation, crop coefficients and yield response factors for maize irrigation scheduling based on long-term experiments[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(1): 139-149.