

河套灌区灌溉定额对膜下滴灌玉米生产性状及水分利用效率的影响

霍轶珍, 王文达, 韩翠莲, 李生勇, 郭彦芬

(1.河套学院, 内蒙古 巴彦淖尔 015000; 2.内蒙古自治区河套灌区灌溉排水工程技术研究中心, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要:为评价膜下滴灌在河套灌区玉米种植过程中的适宜性,同时筛选出适宜灌区的滴灌灌溉定额。试验以传统漫灌 CK(358 mm)为对照,设置不同滴灌灌溉定额 DP₁(180 mm)、DP₂(200 mm)、DP₃(220 mm)、DP₄(240 mm)和 DP₅(260 mm)共 5 个处理,系统研究了不同处理对玉米全生育期内株高、叶面积指数、地上部生物量累积量、叶片 SPAD 值及产量和水分利用效率的影响。结果表明:各滴灌处理玉米生产指标及水分利用效率均显著高于传统漫灌处理。随滴灌灌溉定额的增加,玉米株高、叶面积指数、地上部生物量累积量和 SPAD 均呈显著增加趋势,整体表现为处理 DP₅>DP₄>DP₃>DP₂>DP₁,但各指标 DP₄ 和 DP₅ 间差异性不显著,说明当灌溉量达到一定值时,继续增加灌溉水量对玉米生长指标影响大幅减弱。膜下滴灌显著提高了玉米产量和水分利用效率,且以处理 DP₄ 增加最显著,产量分别较处理 CK,DP₁,DP₂,DP₃ 和 DP₅ 高 56.06%,40.37%,33.67%,6.50%和 5.48%,水分利用效率高 149.05%,26.56%,25.22%,5.82%和 12.44%。综合分析该地区玉米膜下滴灌灌溉定额以 240 mm 为宜。

关键词:膜下滴灌;株高;叶面积指数;生物量累积量;SPAD;产量;水分利用效率

中图分类号:S274.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0182-06

Effects of Irrigation Quota on Maize Yield Traits and Water Use Efficiency Under Mulched Drip Irrigation in Hetao Irrigation District

HUO Yizhen, WANG Wenda, HAN Cuilian, LI Shengyong, GUO Yanfen

(1.Hetao University, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China; 2.Irrigation and Drainage

Engineering Technology Research Center, Hetao Irrigation District, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract:In order to evaluate the suitability of mulched drip irrigation for maize planting in Hetao Irrigation District, and screen suitable irrigation quota, five treatments of different drip irrigation quotas including DP₁(180 mm), DP₂(200 mm), DP₃(220 mm), DP₄(240 mm) and DP₅(260 mm) were set up, and traditional flooding irrigation (358 mm) was set as the control. The effects of different treatments on plant height, leaf area index, aboveground biomass accumulation, leaf SPAD value, yield, and water use efficiency during the whole growth period of maize were systematically measured. The results show that: the yield and water use efficiency of maize treated by drip irrigation were significantly higher than traditional flooding irrigation; with the increase of drip irrigation quota, the plant height, leaf area index, aboveground biomass accumulation and SPAD all show the significant increase, and the overall performance decreases in the order: DP₅>DP₄>DP₃>DP₂>DP₁; however, the difference between DP₄ and DP₅ is not significant, indicating that when the irrigation amount reaches a certain value, the effect of continuous increase of irrigation water on maize growth index greatly weakens; mulched drip irrigation significantly increases maize yield and water use efficiency, and DP₄ increases these indices most significantly, the yields are 56.06%, 40.37%, 33.67%, 6.50% and 5.48% higher than those of CK, DP₁, DP₂, DP₃ and DP₅, respectively; the water use efficiency increases by 149.05%, 26.56%, 25.22%, 5.82% and 12.44%, respectively. Comprehensive analysis indicates that 240 mm irrigation quota of maize mulched drip irrigation in this area is more suitable.

收稿日期:2018-07-11

修回日期:2019-08-16

资助项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0400205);内蒙古自治区高等学校创新团队发展计划(NMGIRT-B1611);巴彦淖尔市科技局支助项目(2017K54);乌梁素海流域山水林田湖草生态保护修复试点工程支持项目(2019HYYSZX)

第一作者:霍轶珍(1966—),女,内蒙古巴彦淖尔市人,教授,主要从事节水灌溉技术研究。E-mail:805296445@qq.com

通信作者:王文达(1982—),男,内蒙古巴彦淖尔市人,副教授,主要从事节水灌溉技术研究。E-mail:hyz6998@163.com

Keywords: mulched drip irrigation; plant height; leaf area index; aboveground biomass accumulation; SPAD; yield; water use efficiency

内蒙古河套灌区地处干旱半干旱地区,连年干旱少雨,严重影响了当地农业的健康发展,同时,近些年随着灌区节水改造工程的完成,在政策指令下,对河套灌区减少引黄供水 40 亿 m^3 ,减少了 20%,这也进一步加剧了灌区农业用水的紧缺度^[1]。而传统大水漫灌方式灌溉水浪费问题突出,且产出效率较低,因此,这样的背景下,就急需发展和引进新的节水灌溉技术,以实现有限水资源的高效利用和农业的长足发展。

膜下滴灌技术是多年来经过生产实践得以证明的一种节水增产型灌溉技术,且近些年在灌区玉米^[2]和紫花苜蓿^[3]的种植试验过程中也取得了较好的效果。但以往大量学者的研究的侧重点主要集中在膜下滴灌灌溉制度对土壤水热环境变化^[4-7]、作物增产增收及提高水分利用效率等方面的探索^[7-10],而对膜下滴灌灌溉制度对作物整个生育期植株生长发育状况及产量和水分利用效率影响系统的研究鲜有报道,有待进一步深入研究。因此本研究以河套灌区主要经济作物玉米为研究对象,以传统漫灌为对照,设置不同滴灌灌溉定额,系统的研究不同处理对玉米株高、叶面积指数、地上部生物量累积量和叶片 SPAD 值等生理性状指标及水分利用效率和产量的影响,进一步验证滴灌在河套灌区玉米种植过程中的适宜性,促进膜下滴灌技术在灌区的发展应用,对灌区节水农业的发展具有重要意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古巴彦淖尔市临河区城关镇河套

学院灌排试验基地,该地区多年平均降雨量 140 mm,蒸发量 2 306.5 mm,平均气温 6.8℃,平均日照时数 3 229.9 h,无霜期 130 d 左右,属典型的中温带干旱大陆性气候。试验区以粉砂壤土为主,0—100 cm 土壤平均容重 1.51 g/cm^3 ,土壤田间持水量为 0.239 cm^3/cm^3 ,灌溉水源为黄河水,平均矿化度 0.6~0.8 g/L。

1.2 试验设计

试验设置传统漫灌(灌溉定额 358 mm)、滴灌 DP₁(180 mm)、DP₂(200 mm)、DP₃(220 mm)、DP₄(240 mm)和 DP₅(260 mm)共 5 个处理,试验采用小区试验,随机区组排列,小区面积 100 m^2 (20 m×5 m),3 次重复。

春播期,平耙地后采用机械覆膜铺滴灌带及施肥,膜下滴灌采用一膜一带一行的种植模式。播种时施底肥尿素(46% N) 300 kg/hm^2 ,磷酸二铵(16% P₂O₅) 150 kg/hm^2 ;试验地膜选用内蒙古华丰商贸有限责任公司生产聚乙烯普通农用地膜,膜厚 0.008 mm,膜宽 70 cm;滴灌带为内镶贴片式,内径 16 mm,滴头间距 30 cm,流量为 1.8 L/h;玉米品种为当地常规品种西蒙 6 号。人工点种玉米,玉米种植行距 50 cm,株距 28 cm,每垄 2 行。传统漫灌根据当地配水时间,采用传统畦灌的灌水方式进行灌溉,灌第一水时施尿素(46% N) 450 kg/hm^2 ;灌第二水时施尿素(46% N) 300 kg/hm^2 ;灌第三水时不施肥。滴灌灌第三水时施尿素(46% N) 450 kg/hm^2 ,灌第五水时施尿素(46% N) 300 kg/hm^2 ,为提高肥料利用率采用鸭嘴器人工进行施肥。各处理灌溉制度见表 1。

表 1 不同处理灌溉制度

mm

处理	各灌水日期								灌溉定额
	5-06	6-10	6-20	6-31	7-10	7-25	8-05	8-15	
CK		82			97	97		82	358
DP ₁	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	180
DP ₂	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	200
DP ₃	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	220
DP ₄	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	240
DP ₅	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	260

1.3 测定项目与方法

田间微气象站采集玉米生育期气象数据;准确记录玉米各生育期时间,玉米苗期开始,各处理小区选取长势一致的 6 株玉米挂牌标记,每隔 7 d 采用钢尺测量玉米株高,同时测量每株各叶片最长、最宽处,利用公式计算叶面积指数^[11];各生育期选一天利用 SPAD-502 叶绿素仪测定叶片 SPAD 值;各生育期

内,各处理选取长势均匀一致的 3 株植物样,分割后自然晾干,然后放入纸袋在 80℃ 恒温烘箱中烘干至恒重,利用度万分之一精度的电子天平称重,测量地上部生物质量累积量;玉米成熟收获后,每个处理选取 15 株植物样测量穗长、穗粗、穗粒数、百粒重和产量。

1.3.1 水分利用效率的计算

$$WUE = Y_m / ET_m \quad (1)$$

$$ET_m = \Delta W + P + I + G - D \quad (2)$$

式中: Y_m 为玉米产量 (kg/hm^2); ET_m 为生育期耗水量 (mm); ΔW 为生育期内 0—100 cm 土壤贮水量变化 (mm); P 为生育期有效降雨量 (mm); I 为灌溉量 (mm); G 为地下水补给量 (mm); D 为深层渗漏量 (mm)。

1.3.2 渗漏补给量的计算 分别在各处理小区中间埋设 80 cm, 100 cm 两根张力计, 选定距地表为 100 cm 处为作物根系层下边界, 采用达西定律计算地下水补给量与渗漏量。

$$q = K \overline{(\theta)} \left(\frac{\psi_{m2} - \psi_{m1}}{Z_2 - Z_1} + 1 \right) \quad (3)$$

式中: ψ_{m1} 和 ψ_{m2} 分别为土壤层深度为 80 cm 和 100 cm 处的基质势值 (hPa), θ 为 80 cm 和 100 cm 处的平均体积含水率 (%); Z_1 和 Z_2 为两处的埋深 (cm)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft-Excel 2003 进行数据的处理并进行图表的绘制, 利用 SPSS 17.0 进行试验数据的方差检验。

2 结果与分析

2.1 不同滴灌定额对玉米株高的影响

由图 1 可知, 不同处理条件下玉米全生育期株高变化趋势一致, 整体表现为前期生长速率较快, 生育后期玉米逐渐由营养生长转向生殖生长, 生长速率趋于平缓。整个生育期, 各滴灌处理条件下玉米株高整体表现为 $DP_5 > DP_4 > DP_3 > DP_2 > DP_1$, 且均明显高于传统漫灌 CK 处理 ($p < 0.05$), 这是由于滴灌较传统漫灌更好的调节了土壤的水肥气热条件, 为玉米的生长提供了良好的土壤环境, 全生育期处理 DP_1 , DP_2 , DP_3 , DP_4 和 DP_5 平均较 CK 高 18.12%, 27.71%, 34.91%, 40.52% 和 45.1%。苗期至抽雄吐丝期是玉米营养生长旺盛期, 此时植株壮苗生长有利于产量的形成, 研究发现, 处理 DP_4 和 DP_5 间差异性不显著

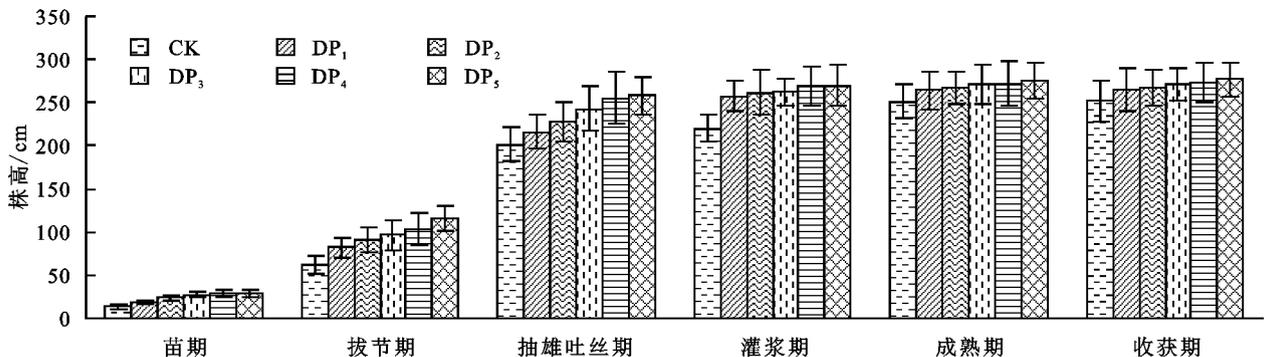


图 1 不同滴灌定额条件下玉米各生育期株高变化

2.2 不同滴灌定额对玉米地上部生物量累积量的影响

由图 3 可知, 随滴灌灌溉定额的增加, 玉米地上

($p > 0.05$), 但均显著高于其他各处理 ($p < 0.05$), 该生育阶段, 两处理平均较处理 CK, DP_1 , DP_2 和 DP_3 高 68.13%, 30.81%, 15.26%, 6.21% 和 76.24%, 36.95%, 20.68%, 11.27%, 这也说明, 在一定的灌溉量范围内, 随灌溉量增加, 可显著促进玉米植株的生长发育, 当灌溉量达到一定值时, 该效应减弱。玉米进入灌浆期以后, 植株进入营养生长, 植株间株高差异减弱, 各滴灌处理间差异性不显著 ($p > 0.05$), 但均明显高于常规灌溉处理 CK。

2.2 不同滴灌定额对玉米叶面积指数的影响

叶面积指数直接影响到作物蒸腾作用及光合产物的形成, 并最终表现在作物产量方面。由图 2 可知, 玉米苗期至拔节期, 叶面积指数增加迅速, 至灌浆期达到全生育期的峰值, 而后随玉米灌浆成熟及叶片的枯萎衰老, 叶面积指数逐渐减小。整体来看, 玉米全生育期内各处理叶面积指数随滴灌定额的增加呈增加趋势, 且各处理均显著高于漫灌处理 CK。不同处理对玉米叶面积指数的影响主要在玉米苗期至抽雄吐丝期的生育前中期, 灌水量越大, 叶面积指数越大, 且此阶段处理 DP_1 , DP_2 , DP_3 , DP_4 和 DP_5 平均较 CK 高 37.94%, 50.76%, 76.27%, 101.43% 和 105.91%, 差异性显著 ($p < 0.05$), 这也增加了对光照的截留, 提高光照利用率, 为玉米光合产物的形成及产量的提高奠定了基础^[12]。但对比发现, 当灌溉量达到 240 mm 以后, 继续增加灌水量, 对叶面积指数的影响减弱。玉米进入灌浆期后, 植株转向营养生长, 植株吸收的养分主要用于籽粒的灌浆, 此阶段各处理间差异性减弱, 但各滴灌处理叶面积指数随灌水量增加呈增加趋势, 且均明显高于常规灌溉处理 CK, 但差异性不显著。由此可见, 滴灌不同灌溉定额主要影响玉米生育前中期叶面积的生长发育, 且在一定灌溉定额范围内, 随灌水量增加叶面积指数呈持续增加趋势, 生育后期影响变弱。

部生物量累积量整体表现为 $DP_5 > DP_4 > DP_3 > DP_2 > DP_1$, 且均显著高于对照处理 CK, 这主要是由于滴灌更

好的调节了土壤的水肥气热条件,促进了植株的生长发育和生育进程,玉米全生育期处理 DP₁, DP₂, DP₃, DP₄ 和 DP₅ 平均较 CK 高 31.37%, 42.74%, 63.52%, 91.22% 和 98.26%。同时对比发现,各生育期处理 DP₄ 和 DP₅ 间地上部生物量累积量相差在 0.03%~2.99%, 差异

性不显著($p > 0.05$), 但均显著高于其他各处理($p < 0.05$)。这也说明,并不是灌溉量越多越有利于地上部生物量累积量的增加,当滴灌灌溉定额达到 240 mm 后,继续增加灌水量,对地上部生物量累积量的影响减弱。

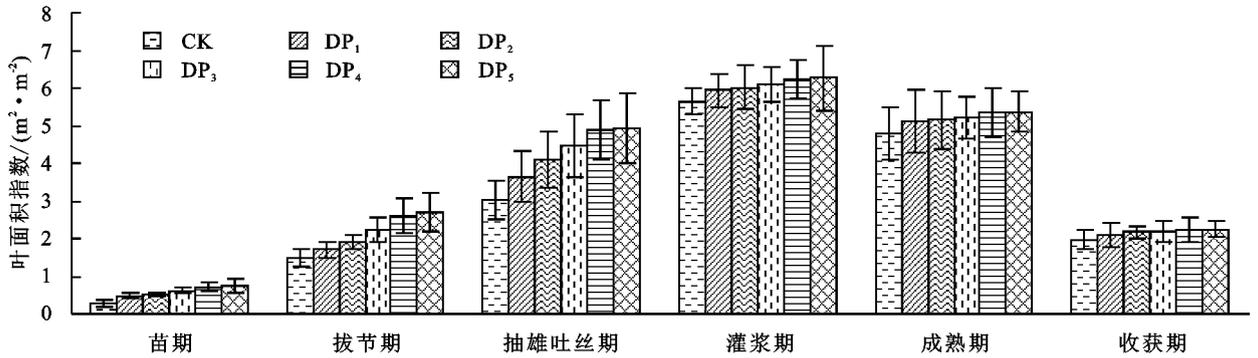


图 2 不同滴灌定额条件下玉米各生育期叶面积指数变化

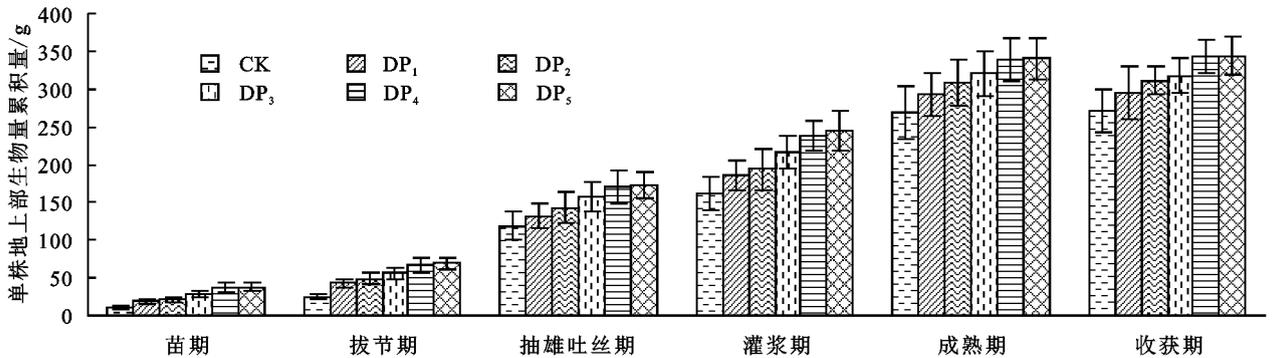


图 3 不同滴灌定额条件下玉米各生育期地上部生物量累积量变化

2.4 不同滴灌定额对玉米叶片 SPAD 值的影响

作物叶片 SPAD 值是反映叶片叶绿素相对含量的指标,从而直接反映作物的生长状况。由图 4 可知,随滴灌定额的增加,玉米叶片 SPAD 值在全生育期同样表现为 DP₅ > DP₄ > DP₃ > DP₂ > DP₁。不同灌溉处理主要影响玉米苗期至灌浆初期叶片 SPAD 值变化,此阶段除处理 DP₄ 和 DP₅ 间差异性不显著外($p > 0.05$),其他各处理间差异达到了显著性水平($p < 0.05$),且各处理均显著高于对照处理 CK,此生

育阶段处理 DP₁, DP₂, DP₃, DP₄ 和 DP₅ 平均较 CK 高 5.72%, 10.65%, 15.35%, 28.50% 和 29.57%。这一方面是由于膜下滴灌灌溉过程中,达到了对玉米根系区的精确灌溉,为玉米生长提供了适宜的土壤水分条,另一方面滴灌较常规灌溉可有效提高肥料利用率,此外膜下滴灌土壤增温保墒效果显著,从而为玉米的生长发育提供了更适宜的土壤水肥热条件^[13-15]。玉米成熟期至收获期,植株衰老枯萎,叶片 SPAD 值显著减小,但此阶段各处理间差异性不显著($p > 0.05$)。

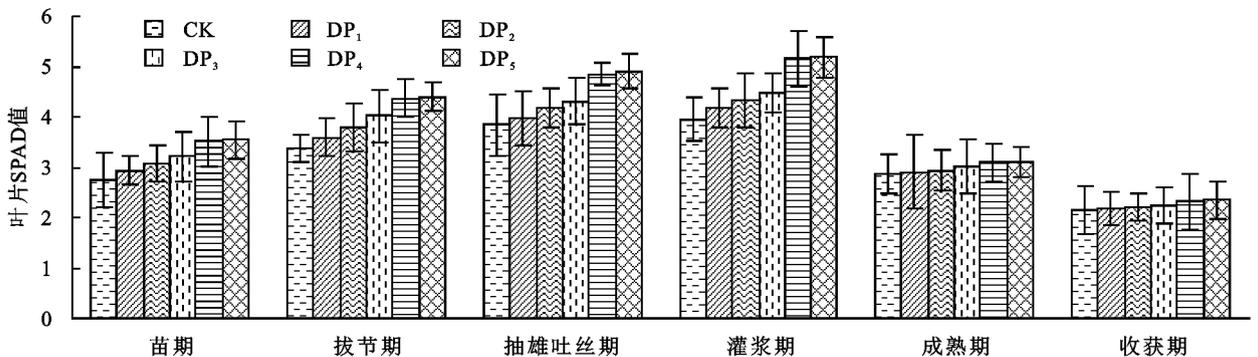


图 4 不同滴灌定额条件下玉米各生育期叶片 SPAD 值变化

2.5 不同滴灌定额对玉米产量及水分利用效率的影响

由表 2 不同处理条件下玉米产量指标对比可知,

玉米穗长、穗粗及穗粒数均表现为处理 DP₅ > DP₄ > DP₃ > DP₂ > DP₁, 说明灌水量对各指标影响显著。

而百粒重和产量则表现为 $DP_4 > DP_5 > DP_3 > DP_2 > DP_1$, 处理 DP_5 和 DP_4 各指标差异性不显著, 但均显著高于其他各处理。说明在一定的灌溉定额条件下, 玉米百粒重和产量随灌水量增加呈持续增加趋势, 但继续增加灌水量对产量的提升具有一定的抑制作用, 且研究发现, 各滴灌处理产量指标均显著高于对照处理 CK, 这主要是由于滴灌在各关键生育期可为玉米的正常生长及时提供水肥供应, 增产效果显著, 处理 DP_1, DP_2, DP_3, DP_4 和 DP_5 平均较 CK 增产 11.18%, 16.75%, 46.54%, 56.06% 和 47.96%。

对于干旱半干旱地区来说, 农业用水日益短缺是制约农业长足发展的关键性因素, 因此在这样的背景

下实现灌溉水的高效利用是我们亟待解决的技术问题, 而作物水分利用效率是衡量水分利用程度的量化指标。研究发现(表 3), 各滴灌处理水分利用效率均显著高于常规灌溉 CK, 以处理 DP_4 最高, 平均较处理, 差异性均达到显著性水平 ($p < 0.05$)。

表 2 不同处理条件下玉米产量指标对比

处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗粒数/粒	百粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)
CK	19.1c	15.3c	584c	34.1c	9532.4f
DP ₁	19.8b	15.9c	615b	35.2b	10598.1e
DP ₂	20.4b	16.6b	631b	35.9b	11129.5d
DP ₃	20.9b	16.9b	638b	36.1b	13968.4c
DP ₄	22.7a	17.8a	671a	38.9a	14876.6a
DP ₅	22.9a	17.9a	683a	38.1a	14104.3b

表 3 不同处理条件下水分利用效率对比

处理	贮水量 变化/mm	灌溉量 I/ mm	降雨量 P/ mm	补给量 G/ mm	渗漏量 D/ mm	总耗水量 ETa/mm	综合水分利用效率/ (kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
CK	45.47	358	51.2	87.42	11.34	530.75a	17.80e
DP ₁	21.35	180	51.2	47.32	0	299.87d	35.34d
DP ₂	20.18	200	51.2	40.19	0	311.57c	35.72d
DP ₃	25.49	220	51.2	33.78	0	330.47b	42.27b
DP ₄	19.45	240	51.2	21.94	0	332.59b	44.73a
DP ₅	21.17	260	51.2	22.17	0	354.54b	39.78c

3 讨论与结论

内蒙古河套灌区地处干旱半干旱区, 连年干旱少雨, 因此, 如何实现水资源的合理灌溉和高效利用是保证农业健康发展的关键技术。而灌溉定额的大小直接影响作物植株的生长发育状况, 从而影响产量的形成。研究发现, 由于滴灌条件更好的调节了土壤环境, 促进了作物生长发育, 玉米全生育期内各生育指标均明显优于传统漫灌处理。

作物植株的高矮表征作物生长态势的优劣, 其在一定程度上影响植株对光照的吸收利用, 从而影响光合产物的形成, 研究发现, 玉米株高随滴灌定额的增加, 呈现增大趋势, 这一结论与李媛媛^[16]和郑和祥^[17]等的研究结论具有相同之处, 且各滴灌处理均显著优于传统漫灌处理, 但并不是灌水越多对植株生长越有利, 当灌溉定额达到一定量后(240 mm), 继续增加灌水量, 对玉米株高影响大大减弱。

叶面积指数大小是影响作物接受光能进行光合作用的关键性因素, 是衡量作物群体结构是否合理的判定依据, 叶面积指数相对越大, 越有利于光合产物的形成。本研究发现, 随滴灌灌溉定额的增加, 叶面积指数呈增加趋势, 且在玉米前中期影响更为显著, 与郭维^[18]等的研究结果相同。但当灌溉定额达到 240 mm 后, 继续增加灌溉定额, 对叶面积指数影响微弱, 这一结论与田育丰^[19]等得出的灌溉定额达

到一定值后叶面积指数下降的结论有所不同, 这可能是由于地域气候有所差异, 导致作物生长生理反应有所不同。

地上部生物量累积量是反映作物生长状况优劣的另一重要指标, 研究发现随灌水量的增加地上部生物量累积量呈增大趋势, 且当灌溉定额达到 240 mm 后, 增幅减弱。

作物叶片 SPAD 值是反映叶片中叶绿素相对含量的指标, 其含量大小直接影响光合作用并最终影响到产量的形成, 研究发现, 随灌溉定额的增加, 叶片 SPAD 值呈显著增加趋势, 说明充足的水分供应, 更有利于植株的光合作用, 但当灌溉定额达到 240 mm 后, 增加效应减弱。

有研究表明^[20], 额外的增加灌溉水量可显著提高作物产量。本研究发现, 随灌溉定额的增加, 玉米穗长、穗粗及穗粒数均呈现不同增加趋势, 但当灌溉定额达到 240 mm 后, 玉米百粒重和产量呈现一定的下降趋势, 这可能是由于灌水量过多, 延长了玉米的成熟进程, 这一结论与李媛媛等^[16]的研究结果相同。同时对比发现, 当灌溉水量达到 240 mm 后, 继续增加灌溉水量, 水分利用效率减小显著。因此综合评价, 滴灌灌溉定额为 240 mm 较适宜在该地区玉米种植过程中推广应用。

参考文献:

[1] 田德龙. 河套灌区盐分胁迫下水肥耦合效应机理及模拟

- 研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [2] 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.
- [3] 田德龙,李熙婷,郭克贞,等.河套灌区地下滴灌对紫花苜蓿生长特性的影响[J].节水灌溉,2015(5):16-19.
- [4] 张昊,郝春雷,孟繁盛,等.膜下滴灌条件下不同灌水量对玉米产量及土壤水分的影响[J].作物杂志,2018,32(1):105-109.
- [5] 杨宏羽,李欣,王波,等.膜下滴灌油葵土壤水热高效利用及高产效应[J].农业工程学报,2016,32(8):82-88.
- [6] 李长照,刘庆华,仲爽.玉米膜下滴灌土层增温效果的研究[J].东北农业大学学报,2009,40(10):49-51.
- [7] 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.
- [8] 夏桂敏,褚凤英,陈俊秀,等.基于膜下滴灌的不同灌水量对黑花生产量及水分利用效率的影响[J].沈阳农业大学学报,2015,46(1):119-123.
- [9] Sezen S M, Yazar A, Eker S. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81 (1/2): 115-131.
- [10] 葛宇,何新林,王振华,等.滴灌灌水量对复播油葵耗水特性和产量的影响[J].灌溉排水学报,2012,31(3):111-113.
- [11] 王自奎.小麦/玉米间作复合群体光能和水传输利用试验与模拟研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [12] 郭彦芬,霍轶珍,韩翠莲,等.不同覆盖方式对玉米生长发育及土壤水分动态变化的影响[J].江苏农业科学,2017,45(6):72-74.
- [13] 井涛.膜下滴灌马铃薯生长发育规律及其对水氮的响应[D].内蒙古呼和浩特市:内蒙古农业大学,2014.
- [14] 赵靖丹,李瑞平,史海滨,等.滴灌条件下地膜覆盖对玉米田间土壤水热效应的影响[J].节水灌溉,2016(1):6-9,15.
- [15] 康静,黄兴法.膜下滴灌的研究及发展[J].节水灌溉,2013(9):71-74.
- [16] 李媛媛,杨恒山,张瑞富,等.灌溉定额对浅埋滴灌春玉米生长与产量的影响[J].水土保持通报,2017,35(2):315-318.
- [17] 郑和祥,郭克贞,郝万龙.作物生长指标与土壤水分状况及地温关系研究[J].水土保持研究,2011,18(3):210-216.
- [18] 郭维.黑龙江省西部玉米膜下滴灌试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2010.
- [19] 田育丰.限量灌溉和施氮水平对春玉米生长及生理特性的影响[J].广西农业科学,2010,41(10):1055-1057.
- [20] Saeed I A M, El-Nadi A H. Forage sorghum yield and water use efficiency under variable irrigation[J]. Irrigation Science, 1998,18(2):67-71.

(上接第 181 页)

参考文献:

- [1] 金丽娜,曲静.西安市 1971—2011 年浅层地温与气温、降水的季节关系特征分析[J].河南科学,2014,32(5):860-862.
- [2] Change I P O C. Climate Change 2013: The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2014.
- [3] 左洪超,吕世华,胡隐樵.中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J].高原气象,2004,23(2):238-244.
- [4] 侯凯,林涛,钱会,等.武功地区气候变化特征及趋势预测[J].水土保持研究,2017,24(4):252-258.
- [5] 赵路伟,徐刚.河南省 1961—2014 年气温和降水量的时空变化特征[J].南水北调与水利科技,2016,14(3):17-23,54.
- [6] 苗正伟,徐利岗,韩会玲.京津冀地区近 55 年气候演变特征分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):125-134.
- [7] 李勇,刘秀明,王世杰,等.1961—2017 年贵州降水时空变化特征[J].水土保持研究,2019,26(6):145-150.
- [8] 罗梅,高文明,唐红祥,等.喀斯特地区近 10 年降水时间动态及统计模型:以修文县为例[J].贵州农业科学,2018,46(10):168-173.
- [9] 黄嘉佑,李庆祥.气象数据统计分析方法[M].北京:气象出版社,2015.
- [10] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
- [11] 黄嘉佑.气候状态变化趋势与突变分析[J].气象,1996,21(5):6-57.
- [12] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493.
- [13] 吴洪宝,吴蕾.气候变率诊断和预测方法[M].北京:气象出版社,2005.
- [14] 任国玉,徐铭志,初子莹,等.近 54 年中国地面气温变化[J].气候与环境研究,2005,10(4):717-727.
- [15] 秦大河,Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J].气候变化研究进展,2014,10(1):1-6.
- [16] 郝治福,康绍忠.地下水系统数值模拟的研究现状和发展趋势[J].水利水电科技进展,2006,26(1):77-81.