

膜下滴灌水肥调控对玉米生长和水肥利用的影响

陈东峰^{1,2}, 罗朋³, 张富仓^{1,2}, 邹海洋^{1,2}, 郭金金^{1,2}, 郑静^{1,2}, 闻磊^{1,2}, 张嘉敏^{1,2}

(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.西北农林科技大学旱区节水农业研究院,陕西杨凌 712100;3.山西省水利水电科学研究院,山西太原 030002)

摘要:针对汾河灌区农业生产中施肥量大,水肥利用效率低的问题,通过研究滴灌条件下不同水肥供应对春玉米生长、干物质累积、分配、转运和产量及水肥利用的影响,为合理的水肥调控措施提供参考。在山西省水利水电科学研究院节水高效示范基地进行大田滴灌试验,设置3个灌水水平,即 W_1 :60%ETc、 W_2 :80%ETc、 W_3 :100%ETc (ETc为作物蒸发蒸腾量);3个施肥水平(N-P₂O₅-K₂O),即 F_1 :100-50-50 kg·hm⁻²、 F_2 :170-75-75 kg·hm⁻²、 F_3 :240-100-100 kg·hm⁻²。结果表明:除产量构成要素外,施肥单因素对其它各指标影响有统计学意义,株高、叶面积指数、干物质累积和产量均随灌水和施肥量的增加而增加,水肥交互作用对产量和灌溉水利用效率影响不显著;高水(W_3)处理比低水(W_1)处理籽粒分配比例高4%,高肥(F_3)处理比低肥(F_1)处理籽粒分配比例高4.64%; W_3F_3 处理产量最大为12 474.34 kg·hm⁻²,比 W_1F_1 处理增产38.36%, W_2F_2 处理比 W_3F_3 处理减产5.2%,但节水528 m³·hm⁻²,节肥120 kg·hm⁻²。灌溉水利用效率随灌水量增加而降低,随施肥量增加而升高,肥料偏生产力随灌水量增加而增加,随施肥量增加而降低; W_2F_2 处理产量灌溉水利用效率为5.61 kg·m⁻³,比 W_3F_3 处理高18.9%,产量偏肥料生产力为37.05 kg·kg⁻¹,比 W_3F_3 处理高30.7%。综合高产、高效和节水、节肥等因素,灌水量为80%ETc,施肥量N-P₂O₅-K₂O 170-75-75 kg·hm⁻²为最优灌溉施肥模式。

关键词:玉米;膜下滴灌;水肥调控;生长;产量

中图分类号:S147.21 **文献标志码:**A

Effects of irrigation and fertilization regulation on maize growth, water and nutrient use of drip irrigation under plastic film

CHEN Dong-feng^{1,2}, LUO Peng³, ZHANG Fu-cang^{1,2}, ZOU Hai-yang^{1,2},
GUO Jin-jin^{1,2}, ZHENG Jing^{1,2}, WEN Lei^{1,2}, ZHANG Jia-min^{1,2}

(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.Institute of Water-Saving Agriculture in Arid Areas of Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Water Resources and Hydropower Research of Shanxi, Taiyuan, Shanxi 030002, China)

Abstract: Aiming at the problem, too much fertilizer and low utilization rate of water in agricultural production of FenHe irrigation areas, the effects of water and fertilizer supply on maize growth, dry matter, yield, IWUE and PFP were assessed to provide a theoretical and experimental basis for the irrigation and fertilizer regulate of maize. The field drip irrigation test was conducted in the water saving demonstration base of water conservancy and hydro-power research institute in Shanxi Province. There were three irrigation levels (W_1 :60%ETc; W_2 :80%ETc; W_3 :100%ETc (ETc is crop evapotranspiration)) and three N-P₂O₅-K₂O fertilizer levels (100-50-50, 170-75-75 and 240-100-100 kg·hm⁻²; denoted as F_1 , F_2 , F_3). The results showed that besides the components of yield, the single factor of fertilization had statistically significant effects on each index. Plant height, leaf area index, dry matter accumulation and yield increased with irrigation and fertilization. Water and fertilizer interaction had no sig-

收稿日期:2017-05-26

修回日期:2017-07-14

基金项目:山西省水利厅项目“汾河灌区农田面源污染的水肥优化调控技术研究”;国家“十二五”863计划课题“农田水肥联合调控技术与设备”(2011AA100504);高等学校学科创新引智计划项目(111计划, B12007)

作者简介:陈东峰,硕士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: chendongfeng1218@163.com

通信作者:张富仓,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

nificant effect on yield and irrigation water use efficiency. The ratio of grain of high water (W_3) treatment was 4% higher than that of low water (W_1), and high fertilizer (F_3) treatment was 4.64% higher than that of low fertilizer (F_1). The yield of W_3F_3 treatment was $12\ 474.34\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and was 38.36% higher than that of W_1F_1 treatment. W_2F_2 treatment was 5.2% lower than W_3F_3 treatment, but saved $528\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ water and $120\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ fertilizer. The utilization efficiency of irrigation water decreased with the increase of irrigation amount, increased with fertilizer application rate. The partial fertilizer productivity increased with irrigation amount, and decreased with the increase of fertilizer. Yield irrigation water use efficiency of W_2F_2 treatment was $5.61\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ and was 18.9% higher than W_3F_3 treatment. Yield partial fertilizer productivity was $37.05\ \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and was 30.7% higher than W_3F_3 treatment. Considering high yield, water saving, fertilizer and high efficiency, 80% ETc irrigation amount and N-P₂O₅-K₂O 170-75-75 kg · hm⁻² fertilizer was the best irrigation and fertilization combination.

Keywords: maize; drip irrigation under mulch; water and fertilizer management; growth; yield;

玉米是涵盖食用、饲料、经济、能源多种功能的作物,占中国粮食种植面积的 1/4^[1],在西北地区粮食生产中占有非常重要的地位。水和肥是玉米生长必不可缺的两因素,合理的灌水施肥可以促进作物生长发育,提高作物产量^[2],但实际农作生产中,为了追求粮食高产,普遍存在过量灌水和施肥,不仅造成水、肥浪费,降低水肥利用率,还可使土壤中的无机养分如硝态氮、铵态氮累积并淋溶至地下水,造成农业面源污染^[3]。因此,研究合理的水肥调控措施,不仅对提高农田水肥利用效率有重要作用,还对改善农田环境有重要意义。近些年来,水肥互作效应及其对作物生长的影响已被众多学者所共识,并有大量的研究文献所报道。研究表明,施氮量在一定的范围内与小麦千粒重和产量及玉米百粒重和产量呈正相关,且能有效提高作物水分利用效率^[4-6];充分的水、氮供应能显著提高玉米营养器官的干物质累积,且主要增加叶部位干物质的累积^[7,8];地面灌溉条件下,氮肥和钾肥耦合对夏玉米叶面积指数有显著影响,其中灌水作用>施氮作用>施钾作用,对籽粒、苞叶、穗轴、茎秆、叶等器官均有显著影响^[9];水氮耦合下的灌溉水分生产效率随施氮量增加而增加,滴灌条件下灌水和施氮可达到产量和水氮利用效率同步提高的目的^[10];滴灌水氮耦合下分次追肥对大蒜增产效果显著^[11],肥料 100% 滴施下的玉米产量和灌溉水利用效率最高^[12]。

山西汾河灌区是山西省最大的自流灌区,是山西省主要的粮食产地之一^[13],玉米是该地区主要的粮食作物^[14]。近年来,汾河灌区春玉米灌溉定额高达 $360\ \text{mm}$ ^[15],春玉米单位面积施氮肥和磷肥(折纯量)分别是 $253\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $105\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,远远超过国际上为防止水体污染而设置的 $225\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的安全上限^[16]。近年来,水肥一体化灌溉施肥技术的发展,为作物的高效水肥管理提供技术支撑,但在

该地区缺乏滴灌施肥条件下不同水肥供应对玉米生长和水肥利用的影响的研究报道,特别是缺乏玉米在灌溉施肥条件下水分养管理技术。在山西汾河灌区的氮磷钾肥配施对春玉米生长、产量和水肥利用效率的影响还鲜有报道。本试验利用覆膜和滴灌施肥相结合的技术,研究不同灌水施肥调控措施对山西汾河灌区春玉米生长、干物质累积分配、产量和水肥利用效率的影响,为汾河灌区春玉米实施精确的滴灌施肥管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于 2016 年 4-9 月在山西省水利水电科学研究院节水高效示范基地 ($112^{\circ}33'E, 37^{\circ}44'N$) 进行。试验地海拔 $775.4\ \text{m}$,属温暖带大陆性半干旱气候,四季分明、光热资源丰富。年均气温 9.6°C ,无霜期 170 天,年均日照时数 $2\ 675.8\ \text{h}$,多年平均降雨量 $430\ \text{mm}$,年均蒸发量 $1\ 812.7\ \text{mm}$ 。试验地土壤质地为粘壤土,耕层土壤容重为 $1.39\ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间体积持水量为 34.0%。供试玉米为“先玉 335”,试验肥料采用尿素(N 46.4%)和史丹利复合肥(N-P₂O₅-K₂O 18%-18%-18%)配比使用,采用施肥泵施肥。地膜选用聚乙烯塑料薄膜,厚 $0.008\ \text{mm}$,宽 $0.8\ \text{m}$ 。采用内镶式圆柱滴头滴灌带,内径 $8\ \text{mm}$,滴头间距 $30\ \text{cm}$,滴头流量为 $2\ \text{L} \cdot \text{h}^{-1}$,滴灌带布设在窄行中间。

1.2 试验设计

设置滴灌灌水和施肥两因素,灌水以作物蒸发蒸腾量 ETc 为基础,施肥以前期调查获得当地施肥量(N-P₂O₅-K₂O, 240-100-100 (kg · hm⁻²)) 为基础。两因素各设置 3 个水平:即低水(W_1 : 60% ETc)、中水(W_2 : 80% ETc)和高水(W_3 : 100% ETc);低肥(F_1 : N-P₂O₅-K₂O, 100-50-50 (kg · hm⁻²)),中肥(F_2 : N-P₂O₅-K₂O, 170-75-75 (kg · hm⁻²))、

高肥 (F_3 : $N - P_2O_5 - K_2O$, 240 - 100 - 100 ($kg \cdot hm^{-2}$)), 共9个处理, 3次重复, 共27个小区。作物蒸发蒸腾量 $ET_c = K_c \times ET_o$, ET_o 为参考作物蒸发蒸腾量, K_c 为作物系数, 依据 2005-2015 过去 10 年气象数据按 Penman Monteith 修正公式计算^[17], 然后取均值。 K_c 前期取 0.7 (苗期~拔节期), 中期取 1.2 (吐丝期~灌浆期), 后期取 0.6 (乳熟期)^[18]。 试验小区面积为 $7 m \times 5 m = 35 m^2$, 宽窄行种植, 窄行 40 cm, 宽行 85 cm, 株距 28 cm, 种植密度为 $59\ 445$ 株 $\cdot hm^{-2}$, 4月23日播种, 9月24日收获。从苗期开始每 10 天灌水一次, W_1 、 W_2 和 W_3 总灌水量分别为 158.41 mm、211.22 mm 和 264.02 mm。按玉米的生长特性, 于苗期、拔节期、吐丝期和灌浆期进行施肥, 且施肥量分别占总施肥量的 20%、30%、30% 和 20%。

1.3 观测指标及方法

生长指标测定: 在玉米苗期 (播后 25 天)、拔节期 (播后 76 天)、吐丝期 (播后 86 天)、灌浆期 (播后 104 天)、乳熟期 (播后 123 天) 和成熟期 (播后 155 天) 每小区破坏性取 3 株样测定株高、叶面积 (苗期不破坏性取样, 只用直尺从地面垂直测得植株最高值为株高, 无叶面积指数和干物质质量, 成熟期叶全黄, 故也无叶面积)。将植株各器官分开, 称鲜重后放入烘箱, 在 $105^\circ C$ 杀青 30min, 然后于 $85^\circ C$ 烘至恒重, 测定植株地上部分干重。

产量测定: 成熟期每小区选取一行测定玉米穗长、穗粗、秃尖长、单穗籽粒重、千粒重, 风干籽粒至 14% 含水量时测定籽粒产量。

相关指标计算公式^[19, 20]:

叶面积 (m^2) = 叶片长 \times 叶片宽 $\times 0.75$;

叶面积指数 (LAI) ($m^2 \cdot m^{-2}$) = 单株叶面积 \times 单位面积内玉米株数;

干物质分配率 (%) = (器官干物质/地上部干物质) $\times 100\%$;

吐丝前营养器官干物质转运量 ($kg \cdot hm^{-2}$) (DTABS) = 吐丝期营养器官干重 - 收获期营养器官干重;

吐丝前营养器官干物质转运率 (%) (DTRBS) = (吐丝前营养器官干物质转运量/吐丝期营养器官干重) $\times 100\%$;

吐丝前营养器官干物质转运量对籽粒产量贡献率 (%) (GCRBS) = (吐丝前营养器官干物质转运量/籽粒干产量) $\times 100\%$;

吐丝后同化物输入籽粒量 (PIAAS) ($kg \cdot hm^{-2}$) = 籽粒干产量 - 吐丝前营养器官干物质转

运量;

吐丝后同化物对籽粒贡献率 (%) (GCRAS) = $1 - \text{吐丝前营养器官干物质转运量对籽粒产量贡献率}$;

灌溉水利用效率 (IWUE) ($kg \cdot m^{-3}$) = 籽粒产量 (生物产量) / 灌水量;

肥料偏生产力 (PFP) ($kg \cdot kg^{-1}$) = 籽粒产量 (生物产量) / 施肥量。

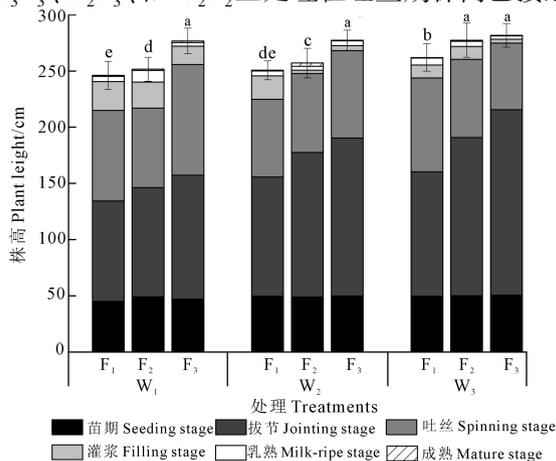
1.4 数据处理

用 Excel 2010 进行数据整理, SPSS 19.0 统计分析软件处理试验数据, 选取 Duncan 进行方差分析, 用 Origin 8.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同灌水施肥措施对玉米生长的影响

2.1.1 不同灌水施肥措施对玉米株高的影响 株高能反映玉米的生长发育状况, 图 1 为不同灌水施肥措施下玉米株高在全生育期内变化情况。不同处理玉米株高在全生育期内不断增加, 苗期至拔节期株高增长量最大, 高水高肥 (W_3F_3) 处理增长最多为 167.3 cm; 拔节至吐丝期株高增长速率最快, 平均为 $7.5 cm \cdot d^{-1}$ 。苗期各处理株高无显著差异, 拔节期各处理株高差异显著。吐丝至灌浆期各处理株高差不断减小但仍有显著差异, 拔节之后株高变化趋势相同即株高与灌水量和施肥量呈正相关关系; F_3 施肥量下不同灌水量处理对玉米最终株高无显著影响, 说明高施肥水平下灌水量越大, 玉米生长发育越早、越快, 但最终株高差异不大; 收获时 W_3F_3 处理株高最大为 281.7 cm, W_1F_1 最小为 246.05 cm。 W_3F_3 、 W_2F_3 、和 W_2F_2 三处理在吐丝期株高已接近最



注: 不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Different small letters mean significant difference among treatments at 0.05 level at the same growth stage. The same as below.

图 1 不同水肥处理对玉米株高的影响

Fig.1 Effects of different water and fertilizer treatments on maize plant height

大值,吐丝后株高增长量小、增长缓慢;其它处理灌浆期株高仍有变动。

2.1.2 不同灌水施肥措施对玉米叶面积指数(LAI)的影响 叶面积指数(LAI)反映作物群体的叶面积大小、植株光合和蒸腾蒸发作用的强弱。如表 1,全生育期内 LAI 均表现为:拔节至吐丝期迅速增大,吐丝至乳熟期基本稳定并有缓慢减小的趋势。拔节期同一灌水量下 LAI 随施肥量的增加而增加, W_3F_3 和 W_1F_1 处理差异显著。吐丝期 LAI 值是整个生育期内最大的(W_1F_3 处理和 W_1F_1 处理除外),灌水量越大, LAI 值越大。灌浆期同一灌水量下 LAI 差异显著,施肥量对 LAI 的影响达到极显著水平 ($P < 0.01$),说明在该试验条件下灌浆期施肥能显著影响 LAI。

2.2 不同灌水施肥措施对玉米地上部分干物质累积、分配和转运的影响

2.2.1 不同灌水施肥措施对玉米干物质累积的影响 玉米地上部分干物质的累积直接关系着籽粒产量,如图 2 所示,拔节期干物重在 W_2 处理下获得最大值且随施肥量增加而增加, W_1 处理下拔节期施肥过多对干物质累积有抑制作用,吐丝期高水高肥处

理(W_3F_3)干物质累积量明显高于其它处理。全生育期内干物质不断累积增加,至成熟期达到最大,且随灌水量和施肥量的增加而增大; W_3F_3 处理单株干物质累积量最大,值为 $23.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, W_1F_1 处理干物质累积量最小,值为 $17.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,其它处理干物质总累积量无显著差异。

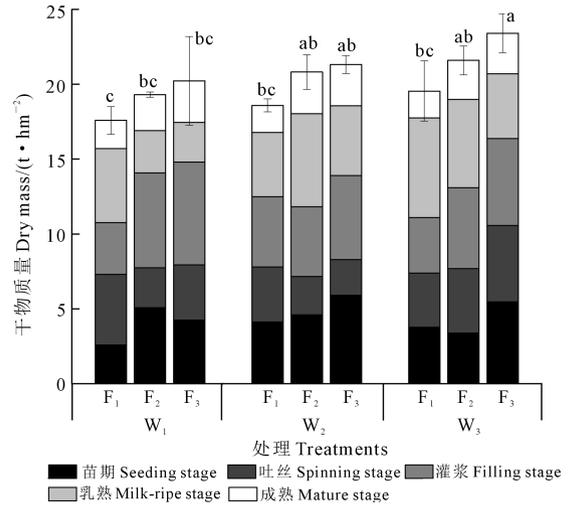


图 2 不同水肥处理对玉米干物质累积的影响

Fig.2 Effects of different water and fertilizer treatments on maize dry matter accumulation

表 1 不同水肥处理对玉米 LAI 的影响

Table 1 Effects of different water and fertilizer treatments on LAI of maize

灌水 Irrigation	施肥 Fertilization	拔节期 Jointing stage	吐丝期 Spinning stage	灌浆期 Filling stage	乳熟期 Milk-ripe stage
W_1	F_1	1.25b	3.36e	3.00d	3.42a
	F_2	1.49b	3.75bc	3.32c	3.12abc
	F_3	2.29ab	3.61cde	3.83a	2.79c
W_2	F_1	1.66ab	3.85abc	3.48bc	3.20ab
	F_2	1.73ab	3.90abc	3.70ab	3.38ab
	F_3	2.31ab	4.01ab	3.60abc	3.04bc
W_3	F_1	1.71ab	3.63cde	3.40bc	3.01bc
	F_2	2.07ab	3.73bcd	3.34c	3.25abc
	F_3	2.57a	4.11a	3.84a	3.09abc
<i>F</i> 值 <i>F</i> value					
灌水 Irrigation	0.07	4.90*	3.60	1.08	
施肥 Fertilizer	5.78*	8.33**	17.11**	4.97*	
灌水×施肥 Irrigation×Fertilizer	1.07	5.96*	5.06*	3.32	

注:同列不同字母表示($P < 0.05$)显著差异; * 表示差异显著($P < 0.05$), ** 表示差异极显著($P < 0.01$),下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference; * mean significant difference, while ** mean much significant difference, the same as below.

2.2.2 不同灌水施肥措施对玉米地上部分干物质分配的影响 玉米全生育期内各器官干物重不断变化,除籽粒外其余器官干物重呈先增大后减小的趋势,茎、叶、穗轴、苞叶干重分别在灌浆、乳熟、乳熟、灌浆期达到最大。研究不同生育期各器官干物质分配情况可以调控和优化干物质分配比例从而

优化籽粒产量。如图 3 和图 4 所示,随生育期推进茎、叶、穗轴和苞叶占比例不断减小,灌浆前不同灌水和施肥处理对茎分配比无显著影响,乳熟和成熟期高水(W_3)和高肥(F_3)处理茎分配比例最小;不同灌水处理对吐丝和灌浆期叶分配比例影响差异显著,且中水处理下分配比例最大。不同灌水和施

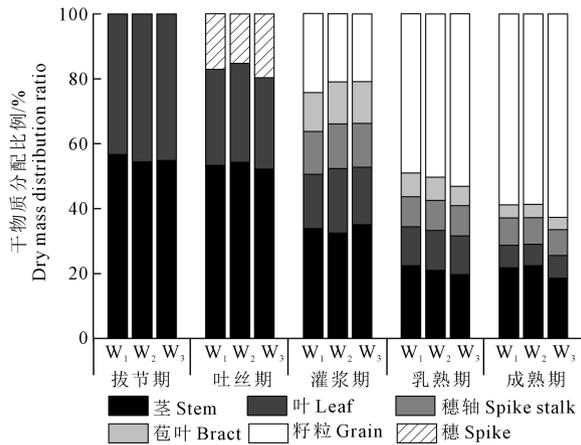


图 3 不同灌水处理对玉米各器官干物质分配的影响
Fig.3 Effects of different water treatments on maize dry matter partitioning of various organs

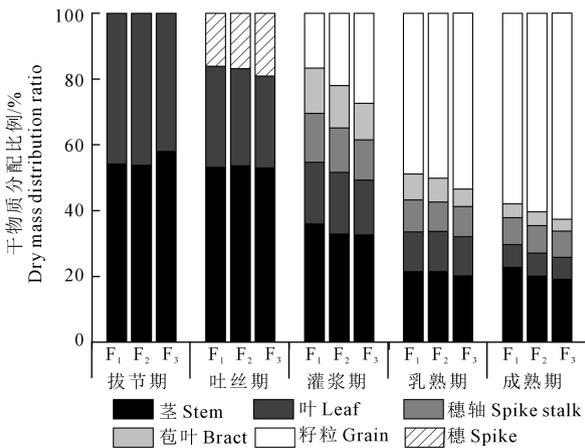


图 4 不同施肥处理对玉米各器官干物质分配的影响
Fig.4 Effects of different fertilizer treatments on maize dry matter partitioning of various organs

肥处理对灌浆、乳熟和成熟期籽粒分配比例影响显著(灌水对灌浆期籽粒分配比例除外);成熟期高水(W₃)处理比低水(W₁)处理分配比例高 4%,且差异显著(P<0.05),高肥(F₃)和中肥(F₂)处理比低肥(F₁)处理分配比例高 4.64%和 2.21%,均达到显著差异(P<0.05)。因此,适当的增加灌水和施肥量能提高籽粒分配比,降低其它器官分配比,从而提高产量。

2.2.3 不同灌水施肥措施对玉米营养器官干物质转运及对产量贡献的影响 如表 2 所示,吐丝前营养器官干物质转运量在 370.35~1766.11(kg·hm⁻²)之间,中水(W₂)灌水水平下不同施肥处理营养器官干物质转运量有显著差异,相同灌水水平下高肥(F₃)施肥量下转运量最大。与转运量变化趋势相同,只有中水(W₂)灌水水平下转运率差异显著,在各灌水水平下中肥(F₂)施肥量下转运率均最低,其对籽粒贡献率亦是最低。与吐丝前干物质转运量规律相反,吐丝后干物质转运输入籽粒量中肥(F₂)施肥量下最大,对籽粒产量贡献率亦是中肥(F₂)施肥量下最大,且中水(W₂)灌水水平下不同施肥处理吐丝后干物质转运输入籽粒量差异显著。

2.3 不同灌水施肥措施对玉米产量及构成要素的影响

表 3 为不同灌水施肥措施对玉米产量及其构成要素的影响,由表 3 可知,在 W₂F₃处理穗长最大,W₁F₃处理穗粗最大,W₃F₃处理最小,穗粗随灌水量的增大而减小,不同处理间无显著差异。单穗籽粒重在同

表 2 不同处理吐丝后营养器官干物质再分配量和吐丝后累积量

Table 2 Different treatments on dry matter translocation amount from vegetative organs to grain and the accumulation amount after spinning

灌水 Irrigation	施肥 Fertilization	吐丝前营养器官干物质转运量 DTABS/(kg·hm ⁻²)	吐丝前营养器官干物质转运率 DTRBS/%	吐丝前营养器官干物质转运对籽粒产量贡献率 GCRBS/%	吐丝后同化物输入籽粒量 PIAAS/(kg·hm ⁻²)	吐丝后同化量对籽粒贡献率 GCRAS/%
W ₁	F ₁	1126.78abc	18.87ab	14.41ab	6637.25d	85.59cd
	F ₂	1163.64abc	17.20abc	12.04abc	8248.64c	87.96bcd
	F ₃	1381.21ab	21.40ab	14.21ab	8330.64c	85.79cd
W ₂	F ₁	1592.53a	23.02a	18.44a	6824.94d	81.56d
	F ₂	370.35c	6.21d	3.56d	9846.26ab	96.45a
	F ₃	1766.11a	24.50a	17.12a	8526.58bc	82.89d
W ₃	F ₁	853.63abc	13.78abcd	8.33bcd	9340.00abc	91.67abc
	F ₂	468.13bc	7.44cd	4.32cd	10276.21a	95.69ab
	F ₃	873.55abc	11.12bcd	8.08bcd	9924.78ab	91.92abc
<i>F</i> 值 <i>F</i> value						
灌水 Irrigation	3.24	6.35 *	7.07 **	18.20 *	7.07 *	
施肥 Fertilizer	4.81 *	7.50 *	8.01 **	14.31 **	8.01 **	
灌水×施肥 Irrigation× Fertilizer	1.77	2.36	2.44	1.79	2.44	

—灌水水平下随施肥量增加而增大,同一施肥水平下随灌水量的增加而增加,在 W_3F_2 处理取得最大值,为 $246.85 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ 。同灌水量下 (W_2 灌水量除外) 千粒重与施肥量呈正相关关系, W_1F_1 处理值最小为 334.81 g , W_2F_2 值最大为 384.47 g 。产量分别在 W_3F_3 处理和 W_1F_1 处理获得最大和最小值,分别为 $12\ 474.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $9\ 015.87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 但 W_3

F_2 与 W_3F_3 处理产量较为接近,说明高水中肥 (W_3F_2) 情况下继续增加施肥量对产量提升效果不明显。 W_2F_2 、 W_3F_2 、 W_3F_3 与 W_1F_1 处理相比,产量分别增高 31.52%、38.35%、38.36%, W_3F_3 与 W_2F_2 相比增产 5.2%, 但 W_2F_2 比 W_3F_3 少灌水 25%、少施肥 37.5%, 所以 W_2F_2 在减产不显著下节水节肥更明显。

表 3 不同水肥处理对玉米产量及构成要素的影响

Table 3 Effects of different water and fertilizer treatments on yield and yield components of maize

灌水 Irrigation	施肥 Fertilization	穗长/cm Ear length	穗粗/mm Ear diameter	秃尖长/cm Bald long	单穗籽粒重/g Weight of ear grain	千粒重/g Thousand grain weight	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield
W_1	F_1	18.92b	42.26cde	0.91b	178.43c	334.81c	9015.87c
	F_2	20.32a	44.92ab	0.65b	216.94ab	369.64abc	10961.85ab
	F_3	20.56a	45.86a	0.81b	223.53a	377.38a	11294.43ab
W_2	F_1	19.90ab	43.11bc	1.71a	193.82bc	337.79bc	9793.31bc
	F_2	20.07ab	42.95bcd	0.90b	234.67a	384.47a	11857.26a
	F_3	20.60a	41.53cde	1.12b	235.83a	348.51abc	11916.24a
W_3	F_1	19.97ab	40.47de	0.63b	234.42a	349.88abc	11844.57a
	F_2	19.96ab	40.39e	0.82b	246.85a	353.14abc	12473.04a
	F_3	20.45a	39.73e	1.06b	246.87a	372.86ab	12474.34a
<i>F</i> 值 <i>F</i> value							
灌水 Irrigation	0.35	19.45**	6.73**	9.78**	0.08	10.81**	
施肥 Fertilizer	4.31*	0.73	2.38	11.12**	5.66*	11.01**	
灌水×施肥 Irrigation× Fertilizer	1.08	2.94*	3.06*	2.01	2.10	1.05	

2.4 不同灌水施肥措施对玉米灌溉水利用效率和肥料偏生产力的影响

由表 4 可以看出,籽粒产量和生物量的灌溉水利用效率 (IWUE) 均是 W_1F_3 处理最高,分别为 $7.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $12.77 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, W_3F_1 处理最低,分别为 $4.49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $7.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可见,随灌水量增加, IWUE 表现出“ $W_1 > W_2 > W_3$ ”的规律, W_1 处理下籽粒产量的 IWUE 均值分别比 W_2 、 W_3 处理增加 24.23%、41.64%, 生物产量的 IWUE 同比分别增加 26.67%、47.21%; 相同灌水量下随施肥量增加 IWUE 从大到小依次为 F_3 、 F_2 、 F_1 (籽粒 IWUE 中 W_3F_3 除外), 说明增加施肥量能提高 IWUE。偏肥料生产力 (PFP) 均是 W_1F_3 处理最低,分别为 $25.67 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $45.96 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, W_3F_1 处理最高,分别为 $59.22 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $97.72 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同一灌水量下 PFP 与施肥量呈负相关关系, 即 $F_1 > F_2 > F_3$, 说明增加施肥量会减小 PFP; 相同施肥量下 PFP 随灌水量增加而增加, F_1 处理的籽粒产量 PFP 分别比 F_2 、 F_3 高 38.98%、88.98%, 生物产量 PFP 分别高 43.43%、88.37%, 灌

水和施肥对两种指标影响均达显著水平。

3 讨论

合理的水肥调控措施可以达到以水调肥,以肥促水的目的; 不合理的水肥措施将抑制作物生长,降低作物的水分和养分利用效率。有研究表明,施磷能增加玉米叶面积指数并促进玉米茎和叶的干物质累积^[21]; 膜下滴灌条件下,增加灌水或施肥量都可以促进西瓜的生长并提高光合速率、增加西瓜产量^[22]。这与本研究结论一致。王连君等^[23]在膜下滴灌水肥耦合对塑料大棚葡萄生长发育影响的研究中得出,灌水和施肥量都存在一个阈值,达到阈值后,继续增大灌水和施肥量,会对生长有抑制作用,本研究表明随灌水和施肥量的增加玉米株高持续增加,并没有受到抑制,其原因可能是本研究水肥量设置还不够大,再加上降雨和灌水的淋溶,使土壤中的养分含量还在作物能够吸收利用的范围内,所以水肥施入量越高,玉米生长发育越好。向友珍等^[24]认为叶面积指数随生育期呈先增大后减小的趋势,在抽雄期叶面积指数最大,这与本研

究结果不完全相同,本研究也表明叶面积指数随生育期推进先增加后减小,但多数处理叶面积指数在吐丝期最大。叶面积指数对施肥量更为敏感,可能是因为叶片生长需要更多氮素供应的原故。在 F_2 施肥水平下, W_2 处理整个生育期叶面积指数之和

于 W_1 和 W_3 处理,原因可能是在 F_2 施肥水平下, W_1 处理存在水分胁迫抑制了作物根系生长,从而减少了养分吸收量,而 W_3 处理下灌水量过高造成了土壤根区养分淋失。

表4 不同水肥处理对玉米 IWUE 和 PFP 的影响

Table 4 Effects of different water and fertilizer treatments on IWUE and PFP of maize

灌水 Irrigation	施肥 Fertilization	籽粒产量灌溉水利用效率 IWUE of yield/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	籽粒产量肥料偏生产力 PFP of yield/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	生物量灌溉水利用效率 IWUE of biomass/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	生物产量肥料偏生产力 PFP of biomass/($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
W_1	F_1	5.69b	45.08b	11.10bc	87.92a
	F_2	6.92a	34.26c	12.19ab	60.32bc
	F_3	7.13a	25.67d	12.77a	45.96d
W_2	F_1	4.64c	48.97b	8.80de	92.94a
	F_2	5.61b	37.05c	9.86cd	65.05b
	F_3	5.64b	27.08d	10.09cd	48.45d
W_3	F_1	4.49c	59.22a	7.40e	97.72a
	F_2	4.72c	38.98c	8.18e	67.49b
	F_3	4.73c	28.35d	8.87de	53.2cd
<i>F</i> 值 <i>F</i> value					
灌水 Irrigation	43.77 **	11.66 **	6.98 **	5.12 *	
施肥 Fertilizer	11.06 **	129.68 **	46.63 **	156.04 **	
灌水×施肥 Irrigation× Fertilizer	1.63	3.15 *	0.07	0.10	

高水处理有利于玉米干物质的累积^[16],随着玉米生育期的推进,灌浆后穗部干物质分配明显加快,除穗部所占分配比例增高外其它器官干物质所占比例逐渐降低,表现为前期扩源后期增库^[19];生育前期光合作用同化物用于扩源,后期光合作用同化物则充库,两者都是籽粒产量的重要来源^[25],后者对籽粒产量的贡献率在 78%~84%之间,合理的氮肥管理可以促进后期干物质向籽粒的转运,从而协调“源”和“库”的关系,达到“源”和“库”的平衡^[26]。本研究表明,春玉米地上部分干物质的累计量表现为 $W_3 > W_2 > W_1$ 和 $F_3 > F_2 > F_1$,吐丝期以前茎和叶所占比例最大,灌浆以后籽粒干重占比例增加,乳熟期增量最大,至成熟期所占比例超过 50%, W_3 处理和 F_3 处理籽粒占比例最大;吐丝后同化物干物质转运对籽粒产量贡献率在 81.56%~96.45%,该结果比前人结果偏高,可能是土壤肥力分布不均匀、灌水施肥过程中管道漏水、堵塞、降雨分布不均和气象等因素共同作用的结果。

偏肥料生产力(PFP)是反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的指标^[27],产量、灌溉水利用效率是评价一种水肥管理措施对作物调控结果的重要指标^[28],有学者研究认为滴灌施肥下各因素与产量均呈正相关关系^[29],油菜产量在一定范

围内随施氮量的增加而增加^[30];在同等灌水条件下,施肥可提高灌溉水利用效率^[31];王秀康^[32]认为水肥交互作用对番茄产量影响显著,王丹等^[33]认为水氮交互对小麦产量影响显著;宋明丹^[34]研究认为水氮交互对冬小麦夏玉米产量无显著影响。本研究结果认为水肥交互作用对产量的影响不显著,这可能与后期降雨较多有关,但灌水和施肥单因素对产量和 IWUE 影响显著,且与产量正相关;IWUE 随施肥量增加增高,PFP 随灌水量增加增高,低水低肥虽获得最高水分利用效率,但产量较低,中水中肥在不减产的前提下兼顾水肥高效利用,更利于实际生产。

4 结 论

1)除产量构成要素外,施肥单因素对其它各指标影响显著,水肥交互作用对产量和灌溉水利用效率无显著影响。

2) $W_3 F_3$ 处理株高、叶面积指数最大,干物质量也最大,为 $23.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$;高水(W_3)和高肥(F_3)处理籽粒分配比例最高,且与其它处理差异显著($P < 0.05$); $W_2 F_2$ 处理吐丝后同化量对籽粒贡献率最大,为 96.45%。

3)灌溉水利用效率随灌水量增加而降低,随施

肥量增加升高,肥料偏生产力变化趋势与此不同; W_3F_3 处理产量最大为 $12\,474.34\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, W_2F_2 处理比 W_3F_3 处理产量低5.2%,但节水 $528\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,节肥 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; W_2F_2 处理产量灌溉水利用效率为 $5.61\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,产量偏肥料生产力为 $37.05\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$;综合高产、高效和节水节肥等因素,80%ETc灌溉水量和N-P₂O₅-K₂O 170-75-75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施肥量可作为山西汾河灌区最优的灌溉施肥模式。

参考文献:

- [1] 王海峰. 玉米产业在农业生产中的重要作用及发展前景[J]. 种子世界, 2008, 8(06):54-55.
- [2] 杨莉琳, 裴冬, 胡春胜, 等. 水肥配合对太行山山前平原高产区土壤矿质氮分布及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(01):1-7.
- [3] 张丽娟, 马友华, 王桂苓, 等. 农业面源污染中农田氮污染危害及其防治措施[J]. 农业环境与发展, 2010, 10(04):48-52.
- [4] 潘晓莹, 武继承. 水肥耦合效应研究的现状与前景[J]. 河南农业科学, 2011, 40(10):20-23.
- [5] 刘德平, 杨树青, 史海滨, 等. 氮磷配施条件下作物产量及水肥利用效率[J]. 生态学杂志, 2014, 33(4):902-909.
- [6] 杜红霞, 吴普特, 冯浩, 等. 氮施用量对夏玉米土壤水氮动态及水肥利用效率的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(04):82-87.
- [7] 李楠楠, 张忠学. 黑龙江半干旱区玉米膜下滴灌水肥耦合效应试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2010, (6):88-94.
- [8] 王丽梅, 李世清, 邵明安. 水、氮供应对玉米冠层营养器官干物质和氮素累积、分配的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(13):2697-2705.
- [9] 温立玉, 宋希云, 刘树堂. 水肥耦合对夏玉米不同生育期叶面指数和生物量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, (30):89-94.
- [10] 郭丙玉, 高慧, 唐诚, 等. 水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12):3679-3686.
- [11] Zuraiqi S. Enhancement of yield and nitrogen and water use efficiencies by nitrogen drip - fertigation of garlic[J]. Journal of Plant Nutrition, 2003, (26):1749-1766.
- [12] V Ramulu, M D Reddy. Response of rabi maize to irrigation schedules and fertigation levels[J]. Agricultural Research Communication Centre, 2010, (30):104-106.
- [13] 张艳. 特殊水文地质条件下大定额灌溉水分有效性分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [14] 赵培芳, 李玉萍, 姚晓磊. 山西省玉米生产现状与发展问题探讨[J]. 山西农业科学, 2015, 43(08):1031-1034.
- [15] 丁光晔, 樊贵盛, 张艳. 山西省汾河再生水灌区土壤重金属污染及分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(02):53-55.
- [16] 侯彦林, 周水娟, 李红英, 等. 中国农田氮面源污染研究: I 污染类型区划和分省污染现状分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1271-1276.
- [17] Allen R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study [J]. Journal of Hydrology. 2000, 229(1): 27-41.
- [18] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [C]//FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998:19-24.
- [19] 殷文, 冯福学, 赵财, 等. 小麦秸秆还田方式对轮作玉米干物质累积分配及产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(05):751-757.
- [20] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 等. 深松促进春玉米干物质和磷素的积累与转运[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19):106-112.
- [21] 陈远学, 李汉邯, 周涛, 等. 施磷对间套作玉米叶面积指数、干物质积累分配及磷肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10):2799-2806.
- [22] 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7):109-118.
- [23] 王连君, 王程翰, 乔建磊, 等. 膜下滴灌水肥耦合对葡萄生长发育、产量和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6):113-119.
- [24] 向友珍, 张富仓, Mohamed A Rashad, 等. 灌溉施肥对尼罗河三角洲玉米产量和水分利用率的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10):116-126.
- [25] 杨恒山, 张玉芹, 徐寿军, 等. 超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(02):315-323.
- [26] 戴明宏, 陶洪斌, 王利纳, 等. 不同氮肥管理对春玉米干物质生产、分配及转运的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(01):154-157.
- [27] 周罕觅, 张富仓, Roger Kjelgren, 等. 水肥耦合对苹果幼树产量、品质和水肥利用的效应[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12):173-183.
- [28] Hebbar S S, Ramachandrapa B K, Nanjappa H V. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21(01):117-127.
- [29] 孙文涛, 孙占祥, 王聪翔, 等. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(03):563-568.
- [30] Rathke G W, Christen O, Diepenbrock W. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations [J]. Field Crops Research, 2005, 94(2-3):103-113.
- [31] Sharma Sat Pal, Leskovar Daniel I, Crosby Kevin M. Root growth, yield, and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, (136):75-85.
- [32] 王秀康, 邢英英, 张富仓. 膜下滴灌施肥番茄水肥供应量的优化研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(01):141-150.
- [33] 王丹, 李玉中, 李巧珍, 等. 不同水肥组合对冬小麦产量的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(01):28-31.
- [34] 宋明丹, 李正鹏, 冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(02):119-126.