

滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响

张富仓¹, 严富来¹, 范兴科², 李国栋¹, 刘翔¹,
陆军胜¹, 王英¹, 麻玮青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, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要:为探讨不同滴灌施肥水平对春玉米产量及水肥利用效率的影响,应用滴灌施肥技术于 2016 和 2017 年在宁夏旱作节水科技园区试验站开展大田春玉米小区试验。以“先玉 335”为试验材料,设置 4 个灌水水平 (D_{75} : 75%ET_c、 D_{90} : 90%ET_c、 D_{105} : 105%ET_c、 D_{120} : 120%ET_c, ET_c 为玉米需水量)和 4 个 N-P₂O₅-K₂O 施肥水平: 2016 年为 60-30-30 kg/hm² (F_{60})、120-60-60 kg/hm² (F_{120})、180-90-90 kg/hm² (F_{180})、240-120-120 kg/hm² (F_{240}), 2017 年为 150-70-70 kg/hm² (F_{150})、225-110-110 kg/hm² (F_{225})、300-150-150 kg/hm² (F_{300})、375-180-180 kg/hm² (F_{375}), 以 1 个充分灌水 (120%ET_c) 无肥为对照 (CK), 共 17 个处理。研究不同水肥供应对春玉米株高、茎粗、叶面积指数 (leaf area index, LAI)、地上部干物质积累量和产量的影响,并分析其水肥利用效率。2 a 试验结果表明:灌水量和施肥量单因素对玉米株高、茎粗、LAI 都有显著或极显著的影响,灌水量和施肥量耦合效应对玉米株高有极显著的影响;灌水量和施肥量对玉米成熟期地上部干物质的影响随着 2 a 施肥梯度的不同而有所差异,在低肥梯度的 2016 年,灌水量和施肥量对地上部干物质积累有显著的影响,其中 $D_{120}F_{180}$ 处理籽粒地上部干物质最大,为 12 691 kg/hm²,在高肥梯度的 2017 年,随着灌水量和施肥量的增加,75%ET_c 和 105%ET_c 处理的地上部干物质积累量有先增加后减小的趋势, $D_{90}F_{300}$ 处理下籽粒地上部干物质积累量最大,为 14 912 kg/hm²;在低肥梯度的 2016 年,灌水施肥量对春玉米产量有显著影响, $D_{120}F_{240}$ 处理产量最高,为 14 400 kg/hm²,而在高肥梯度的 2017 年, $D_{90}F_{300}$ 处理玉米产量最高,为 16 884 kg/hm²; 2 a 试验结果表明灌水量和施肥量对春玉米水分利用效率和肥料偏生产力都有极显著影响。基于春玉米产量和水分利用效率最大值的 95%为置信区间优化水肥管理方案,兼顾节水节肥,推荐灌水量在 323~446 mm、N-P₂O₅-K₂O 施肥量在 210-104-104~325-163-163 kg/hm²。该研究结果对宁夏春玉米滴灌施肥管理具有重要指导意义。

关键词:灌溉; 肥; 蒸腾蒸发量; 春玉米; 产量; 水分利用效率; 肥料偏生产力

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.22.014

中图分类号: S157.4⁺1; S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-22-0111-10

张富仓, 严富来, 范兴科, 李国栋, 刘翔, 陆军胜, 王英, 麻玮青. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 111 - 120. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.22.014

http://www.tcsae.org

Zhang Fucang, Yan Fulai, Fan Xingke, Li Guodong, Liu Xiang, Lu Junsheng, Wang Ying, Ma Weiqing. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(22): 111 - 120. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.22.014 http://www.tcsae.org

0 引言

宁夏扬黄灌区是中国重要的粮食生产基地之一,农业用水占当地用水总量的 90%左右^[1]。随着引黄水量消减及非农业用水量的增加^[2],农业用水短缺逐渐成为制约当地农业可持续发展的因素之一。扬黄灌区农业用水浪费严重,农田灌溉的主要方式是大水漫灌,加之土壤质地偏砂性^[3],农田灌溉渗漏严重,导致灌溉水利用效率较低。同时,过量施肥和施肥方法落后也导致肥料利用率不高,因此,大力发展高效节水灌溉技术,提高农田水肥综合

利用效率,对保障该地区农业的可持续发展与农田生态环境的改善具有重要意义。

应用田间试验手段研究水肥耦合对作物生长和水肥利用效率的影响是制定高效灌溉施肥制度的重要途径。特别是随着滴灌水肥一体化技术广泛应用于农业生产中,该技术能提高作物根区水肥分布的均匀度^[4],在保证作物高产的同时,既能节水节肥,又能大幅度地提高作物的水肥利用效率。目前,国内外在应用水肥一体化技术进行作物灌溉施肥方面已开展了诸多研究。已有研究表明,在砂质土壤下玉米滴灌比传统灌溉的水分利用效率更高^[5]。邹海洋等^[6]研究了甘肃河西地区玉米滴灌施肥水肥耦合效应,认为灌水量 90%ET_c~100%ET_c、施肥量 180-90-90 (N-P₂O₅-K₂O) kg/hm² 是该地区春玉米最佳滴灌施肥策略。孙文涛等^[7]在玉米滴灌水肥耦合试验发现,氮磷肥和灌水量及其交互作用对产量的影响都表现为正效应,其交互作用的效应顺序为氮水>磷水>氮磷。郭

收稿日期: 2018-06-13 修订日期: 2018-08-10

基金项目: 国家重点研发专项 (2017YFC0403303); 国家“十二五”863 计划项目课题 (2011AA100504); 国家“十二五”科技支撑计划“黄土高原扬黄灌区 (宁夏) 增粮增效技术研究与示范” (2015BAD22B05); 教育部高等学校创新引智计划项目 (B12007)

作者简介: 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。Email: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

丙玉等^[8]的滴灌水肥互作试验表明灌水与施氮均可显著增加玉米产量、穗粒数和穗粒质量,二者有明显的正交互作用,且以氮为主效应。刘洋等^[9]认为增加施氮次数能显著增加产量,干物质质量和氮素吸收量随施氮量呈增加趋势,在玉米生育后期表现的更为明显。Sui等^[10]评价了在中国东北地区膜下滴灌玉米产量增加的潜力和最佳施氮量,并认为滴灌具有节水和节肥的潜力。以往的研究多数集中在单一的灌水量和施氮量效应或水肥协同条件下的增产效应,通过产量和水分利用效率等来寻求最佳水肥组合。基于宁夏扬黄灌区潜在作物蒸发蒸腾量而确定适宜的春玉米滴灌水肥管理模式报道较少,本文结合当地农业生产实际,以提高春玉米生长、产量、水肥利用效率为目标,研究探索滴灌施肥条件下春玉米节水节肥、高产高效的灌溉施肥制度,为当地滴灌春玉米实施有效的水肥一体化管理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2016和2017年4—9月在宁夏回族自治区科技厅旱作节水科技园区试验站进行,该试验站位于吴忠市同心县王团镇(36°50'N, 105°60'E),地处中温带半干旱大陆性气候区,多年平均气温8.6℃,多年平均日照时数为3 024 h,无霜期120~218 d。多年平均降水量272.6 mm,平均蒸发量2 325 mm。试验区土壤为砂壤土,土壤容重为1.43 g/cm³,田间持水量为20.25%(质量含水量),全氮0.65 g/kg,有机质8.10 mg/kg,全磷0.77 g/kg,速效磷21.65 mg/kg,速效钾170.00 mg/kg, pH值7.83,地下水埋深40 m以上。试验区2016和2017年玉米生育期(4—9月)内降雨量分别为142和283 mm(图1),试验区玉米播种到收获前20 d左右的有效降雨量分别为100和190 mm。

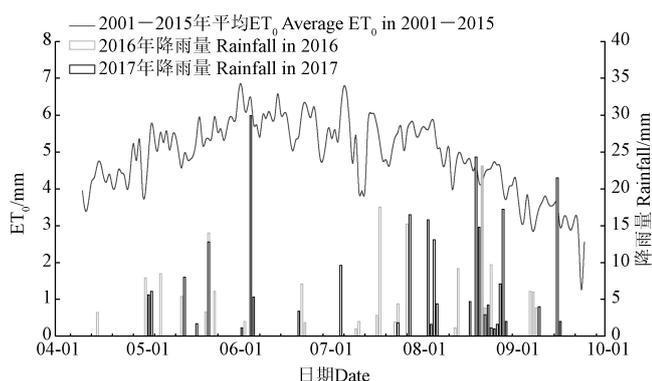


图1 2016年和2017年春玉米生育期内降雨量和多年平均潜在作物蒸腾蒸发量(ET_0)

Fig.1 Multi-year average potential reference crops evapotranspiration (ET_0) and rainfall during spring maize growth stage in year of 2016 and 2017

1.2 试验设计

高聚林等^[11]研究表明粮用玉米的适宜 N:P₂O₅:K₂O 比例大致为1.0:0.5:1.0。本试验考虑到灌区土壤初始速效钾含量较高,调整N:P₂O₅:K₂O的比例为1.0:0.5:0.5。

试验设滴灌灌水量和施肥量2个因素,以施肥量为主区,灌水量为副区。施肥量设4个水平(N-P₂O₅-K₂O),2016年设置低肥梯度水平,分别为:F₆₀(60-30-30 kg/hm²)、F₁₂₀(120-60-60 kg/hm²)、F₁₈₀(180-90-90 kg/hm²)和F₂₄₀(240-120-120 kg/hm²)。由于2016年产量最高的施肥处理为F₂₄₀处理,所得实际产量偏低,因此2017年在此基础上提高了施肥水平,调整为高肥梯度水平(N-P₂O₅-K₂O):F₁₅₀(150-70-70 kg/hm²)、F₂₂₅(225-110-110 kg/hm²)、F₃₀₀(300-150-150 kg/hm²)和F₃₇₅(375-180-180 kg/hm²)。根据作物需水量(crop transpiration, ET_c),设4个灌水量水平:D₇₅(75% ET_c)、D₉₀(90% ET_c)、D₁₀₅(105% ET_c)、D₁₂₀(120% ET_c)。以充分灌水(D₁₂₀)且无肥作为对照(CK)。 ET_c 计算如下^[12]:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (1)$$

式中 ET_0 是根据FAO-56 Penman Monteith (FPM)计算的试验区2001—2015年玉米生长季潜在作物蒸发蒸腾量(图1), K_c 为玉米的作物系数,根据作物生育阶段而定,苗期取为0.7、拔节-灌浆取1.2、乳熟-成熟取0.6^[12]。由于该地区春玉米农业生产中为了控制苗期过快生长,在苗期末期才开始灌水,另外为确保每个灌水处理单次灌水后均不发生深层渗漏,用式(2)计算试验区0~100 cm土壤最大储水量,为286 mm。加上该地区为水库抽水灌区,需采取轮灌工作制度。因此,设计灌水间隔为12 d,遇降雨灌水日期顺延(以人进入作物根区土壤表面行走而不产生凹陷并能进行管理的日期为准)。土壤储水量计算公式为^[13]

$$H = \sum_{i=1}^n 10\theta_i h_i \quad (2)$$

式中 H 为土壤储水量,mm; θ_i 为第 i 层土壤体积含水率,%; h_i 为第 i 层土壤厚度,cm; n 为测土壤体积含水率时的层序,每20 cm为一层,共5层。由于2017年春玉米播种后土壤含水率较低,灌了1次缓苗水,每个处理灌了22.48 mm;另外,该年8月份有效降雨量较大,而第7、8和9次灌水时主要考虑随水施肥。但灌水量过少只能把肥料输送至地表,无法将肥料运送至春玉米主要根系活力区^[14-15],不利于根系对肥料的吸收。因此,D₇₅处理灌水量为20 mm左右,其余处理按比例调整。2016年和2017年春玉米生育期内灌水量和灌水日期见表1。

1.3 田间试验

供试春玉米品种为“先玉335”,为当地推广的密植品种。2016年4月10日播种,2016年9月16日收获,共160 d;2017年4月12日播种,2017年9月18日收获,共160 d。玉米采用宽窄行播种(宽行玉米间距为70 cm,窄行玉米间距为40 cm)和一条滴灌带控制2行春玉米种植方式,滴灌带布设在窄行玉米中间。滴灌带滴头间距为30 cm,滴头流量2.5 L/h,滴头工作压力0.1 MPa,玉米株距为20 cm,种植密度为90 900株/hm²。为保证灌水与施肥的均匀性,采用横向供水方式^[16],每小区长为27.5 m,宽为6.6 m,小区面积为181.5 m²,小区随机区组排列,每个处理3次重复。

表 1 春玉米滴灌灌水试验方案

Table 1 Irrigation schedule of treatments for spring maize

灌水次数 Irrigation times	2016 年					2017 年				
	灌水日期 Irrigation date	实际灌水量 Actual irrigation amount/mm				灌水日期 Irrigation date	实际灌水量 Actual irrigation amount/mm			
		D ₇₅	D ₉₀	D ₁₀₅	D ₁₂₀		D ₇₅	D ₉₀	D ₁₀₅	D ₁₂₀
1	—	—	—	—	—	05-10	22.48	22.48	22.48	22.48
2	06-01	33.04	41.30	49.56	57.82	05-25	34.70	45.17	53.50	62.41
3	06-19	35.74	44.68	53.56	62.49	06-12	36.14	48.18	57.06	66.57
4	07-03	35.32	44.68	53.51	62.34	06-27	56.24	71.68	84.89	99.04
5	07-17	56.10	70.65	84.68	98.70	07-12	50.09	61.65	73.01	85.17
6	07-29	50.91	63.38	76.36	89.87	07-24	52.31	64.39	76.25	88.96
7	08-10	58.70	73.25	87.79	102.34	08-03	23.13	30.93	36.63	42.74
8	08-21	25.97	32.73	38.96	45.19	08-15	23.50	31.38	37.17	43.37
9	09-01	27.01	33.77	40.52	47.27	08-27	17.79	21.90	25.94	30.26
总计 Total		322.79	404.44	484.94	566.02		316.38	397.79	466.93	541.00

注: D₇₅、D₉₀、D₁₀₅ 和 D₁₂₀ 分别表示 75%ET_c、90%ET_c、105%ET_c 和 120%ET_c(ET_c 为作物需水量), 下同。

Note: D₇₅, D₉₀, D₁₀₅ and D₁₂₀ represent 75%ET_c, 90%ET_c, 105%ET_c and 120%ET_c, respectively (ET_c is crop evapotranspiration), the same as below.

春玉米 2 a 试验采用水肥一体化的滴灌施肥方式, 肥料选用尿素 (N-46.4%)、磷酸一铵 (N-12%、P₂O₅-61%) 和硫酸钾 (K₂O-52%) (均为质量分数)。2016 年整个生育期施肥 7 次, 分别为苗期 1 次、拔节期 2 次、吐丝期 2 次, 灌浆期 2 次, 每次施肥量占总施肥量的比例分别为苗期 10%、拔节期 30%、吐丝期 30%、灌浆期 30%; 2017 年整个生育期共施肥 8 次, 分别为苗期 1 次、拔节期 2 次、吐丝期 3 次, 灌浆期 2 次, 每次施肥量占总施肥量的比例分别为苗期 10%、拔节期 30%、吐丝期 35%、灌浆期 25%。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 植株生长指标测定

在春玉米吐丝期中期测定株高、茎粗和叶面积指数。每个小区选取有代表性的植株 5 株, 用游标卡尺测定茎粗, 用卷尺测定株高, 所有叶片长度和最大宽度, 计算叶面积指数, 叶面积指数 (leaf area index, LAI) 计算公式^[17-18]为

$$LAI = \sum_{j=1}^k (0.75l_j b_j / f) \quad (3)$$

式中 k 为叶片数; l_j 为单叶片长度, cm; b_j 为单叶片最大宽度, cm; f 为单株占地面积, cm²。

1.4.2 地上部干物质累积量与产量的测定

在春玉米成熟时期取样, 每个小区选取有代表性的植株 5 株, 从茎基部与地上部分离, 去除表面污垢后各器官分离, 放入烘箱在 105 °C 杀青 0.5 h, 75 °C 下烘至恒质量, 采用电子天平称量并计算单株地上部干物质质量, 最后换算成群体生物量 (kg/hm²)。

在玉米收获后进行产量及其构成要素测定, 选取小区中间相邻 2 条滴灌带控制的 4 行玉米, 连续取 10 株, 风干后测定穗长、穗粗、行粒数和秃尖长, 脱粒测定总质量及其百粒质量, 最终折算成含水率为 14% 的籽粒产量^[9]。

1.4.3 水分利用效率、灌溉水利用效率及肥料偏生产力

水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 计算公式^[19]为

$$WUE = Y/ET \quad (4)$$

式中 WUE 为水分利用效率, kg/m³; Y 为产量, kg/hm²; ET 为作物耗水量, mm; 计算公式为^[20]:

$$ET = P_r + U + I - D - R - \Delta W \quad (5)$$

式中 P_r 为有效降雨量, mm; U 为地下水补给量, mm; I 为灌水量, mm; D 为深层渗漏量, mm; R 为径流量, mm; ΔW 为试验初期和试验末期土壤水分的变化量 (mm), 可由试验获得: 在春玉米的播前和收获后, 在每个小区内取土, 距滴灌带 0、27.5 和 55 cm 3 个位置点取样, 每 20 cm (0~20、>20~40、>40~60、>60~80、>80~100 cm) 取 1 次, 采用烘干法测定土壤水分, 取其平均值作为该小区的土壤含水率 (%)。因试验区地势平坦, 地下水埋藏较深, 根据实测, 生育期内 1 m 深土壤水分变化不大, 且滴灌湿润程度较浅, U 、 R 和 D 均可忽略不计。则可将式 (5) 简化为

$$ET = P_r + I - \Delta W \quad (6)$$

灌溉水利用效率的计算公式^[21]为

$$IWUE = Y/I \quad (7)$$

式中 IWUE 为灌溉水利用效率 (irrigation water use efficiency), kg/m³。

肥料偏生产力的计算公式^[22]为

$$PFP = Y/F_T \quad (8)$$

式中 PFP 为肥料偏生产力 (partial factor productivity of fertilizer), kg/kg; F_T 为所施 N、P₂O₅、K₂O 的总量, kg/hm²。

用 Microsoft Excel 2013 进行数据处理; 用 SPSS 18.0 统计分析软件对试验数据进行方差分析; 用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对春玉米生长的影响

表 2 为 2 a 试验不同水肥处理对春玉米株高、茎粗和 LAI 的影响。结果表明, 灌水量对株高和 LAI 的单因素影响极显著 ($P < 0.01$), 对茎粗的单因素影响显著 ($P < 0.05$); 施肥量对三者的影响均极显著 ($P < 0.01$); 两者的交互作用只对株高有极显著性影响 ($P < 0.01$), 对茎粗和 LAI 的影响均不显著 ($P > 0.05$)。由表 2 可知, D₇₅、D₉₀ 和 D₁₀₅ 灌

水水平下, 2016年 F_{180} 处理株高显著高于 F_{120} 处理 ($P<0.05$), 2017年 F_{150} 处理显著低于 F_{225} 处理 ($P<0.05$); D_{120} 灌水水平下, 2016年与 F_{120} 处理相比, F_{60} 处理有显著性降低 ($P<0.05$), 2017年 F_{225} 处理显著低于 F_{375} 处理 ($P<0.05$)。比较 2 a 试验各处理茎粗之间的差异性可知,

2016年试验同一施肥水平中, 除 $D_{120}F_{60}$ 处理茎粗值显著高于 $D_{90}F_{60}$ 和 $D_{105}F_{60}$ 处理 ($P<0.05$), 其余处理均无显著性差异 ($P>0.05$); 2017年试验同一施肥水平中, 除 $D_{105}F_{300}$ 处理茎粗值显著低于 $D_{120}F_{300}$ 处理 ($P<0.05$), 其余处理均无显著性差异 ($P>0.05$)。

表2 2016和2017年水肥处理对春玉米株高、茎粗和叶面积指数的影响

Table 2 Effects of water and fertilizer treatments on plant height, stem diameter and leaf area index of spring maize in year of 2016 and 2017

		2016年			2017年				
灌水水平 Irrigation level	施肥水平 Fertilization level	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	叶面积指数 Leaf area index	灌水水平 Irrigation level	施肥水平 Fertilization level	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	叶面积指数 Leaf area index
D_{75}	F_{60}	200gh	21.81abcd	3.83cd	D_{75}	F_{150}	270g	25.36cde	4.20de
	F_{120}	215ef	21.40bcd	3.60de		F_{225}	290bc	27.80abcd	5.64a
	F_{180}	226d	22.99abc	4.87ab		F_{300}	292bc	27.25bcde	5.59ab
	F_{240}	221de	24.31ab	4.91ab		F_{375}	290bc	29.89ab	5.65a
D_{90}	F_{60}	195ghi	18.99d	3.60de	D_{90}	F_{150}	274fg	25.54cde	3.80e
	F_{120}	191hi	20.95cd	3.50de		F_{225}	283cdef	24.71de	4.43de
	F_{180}	219de	23.97abc	4.50bc		F_{300}	291bc	27.20bcde	5.19abc
	F_{240}	227d	22.76abc	4.75ab		F_{375}	288bcd	28.81abc	5.19abc
D_{105}	F_{60}	188i	19.14d	2.95ef	D_{105}	F_{150}	242h	24.39de	3.74e
	F_{120}	205fg	22.99abc	3.34de		F_{225}	277efg	26.98bcde	4.76cd
	F_{180}	240c	23.01abc	4.96ab		F_{300}	295b	24.87de	4.79cd
	F_{240}	244c	22.79abc	5.12ab		F_{375}	307a	28.75abc	5.62ab
D_{120}	F_{60}	237c	23.01abc	3.59de	D_{120}	F_{150}	278defg	25.85cde	4.27de
	F_{120}	256b	24.04abc	4.86ab		F_{225}	286bcde	26.02cde	5.51ab
	F_{180}	277a	24.69a	5.25ab		F_{300}	294bc	29.05abc	4.90bcd
	F_{240}	261b	22.79abc	5.40a		F_{375}	313a	31.29a	5.82a
CK		177j	18.79d	2.39f	CK		187i	23.62e	3.99e

ANOVA 检验 F 值 F value of ANOVA

灌水水平 Irrigation level	97.31**	3.92*	7.26**	12.11**	3.80*	7.31**
施肥水平 Fertilization level	257.32**	13.82**	50.89**	343.65**	12.34**	31.74**
灌水水平×施肥水平 Irrigation level ×Fertilization level	8.25**	1.64	2.22	10.13**	1.04	1.69

注: 同列不同字母表示显著性差异 ($P<0.05$), *表示达到显著水平 ($P<0.05$), **表示达到极显著水平 ($P<0.01$), CK 为充分灌水 (120%ET_c) 无肥处理, 下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$), * means significant ($P<0.05$), ** means much significant ($P<0.01$), CK was the fully irrigated (120%ET_c) without fertilizer application, the same as below.

LAI 是反应作物群落叶面积变化的重要参数, 和一定范围的光合作用、蒸腾作用和生物量的形成等密切相关, 对作物高产有着重大的生产意义^[23-24]。由表 2 可知, D_{75} 灌水水平下, 2016年 F_{180} 处理的 LAI 显著高于 F_{120} 处理 ($P<0.05$), 2017年 F_{150} 处理显著低于 F_{225} 处理 ($P<0.05$); D_{90} 灌水水平下, 2016年 F_{180} 和 F_{240} 处理显著高于 F_{120} 处理 ($P<0.05$), 2017年 F_{225} 处理显著低于 F_{300} 处理 ($P<0.05$); D_{105} 灌水水平下, 2016年 F_{180} 和 F_{240} 处理显著高于 F_{120} 处理 ($P<0.05$), 2017年 F_{225} 处理显著高于 F_{150} 处理 ($P<0.05$), 且显著低于 F_{375} 处理 ($P<0.05$); D_{120} 灌水水平下, 2016年 F_{60} 处理比 F_{120} 处理有显著性降低 ($P<0.05$), 2017年 F_{225} 处理显著高于 F_{150} 处理 ($P<0.05$)。

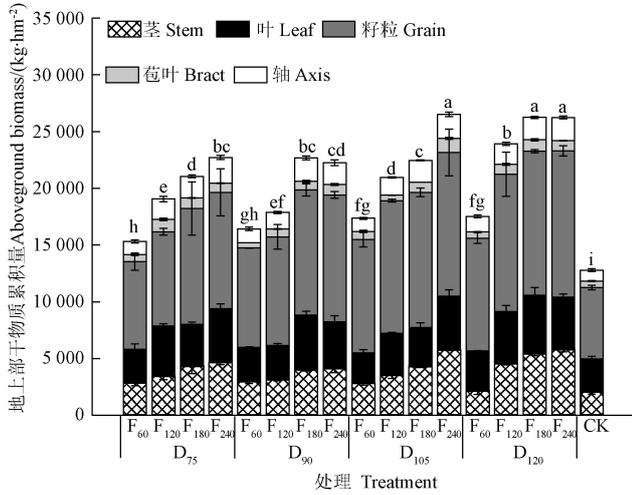
总体看来, 施肥能明显地促进春玉米株高和 LAI 的增长。2 a 试验中, D_{75} 与 D_{90} 灌水水平下, 株高随施肥量的增加呈现先增加后趋于稳定, 而在 D_{105} 与 D_{120} 灌水水平下, 株高随施肥量的增加而增加, 并且增加速率在慢

慢减小。相同灌水处理下, 2017年的株高、茎粗和 LAI 指数普遍高于 2016年, 这可能是因为 2016年降雨量和施肥量较小, 不能有效地满足该地区春玉米的生长。2 a 试验 LAI 最大值分别为 5.40(2016年)和 5.82(2017年), 相对应的处理分别为 $D_{120}F_{240}$ 处理和 $D_{120}F_{375}$ 处理, 与同一施肥水平下的 LAI 无显著性差异, 但显著高于 2016年 F_{120} 处理 ($D_{120}F_{120}$ 处理除外) 和 2017年 F_{150} 处理 ($P<0.05$)。试验结果表明适当提高春玉米的施肥量, 能明显地增加 LAI 和株高, 但当施肥量达到一定程度后, 株高和 LAI 将趋于平稳。

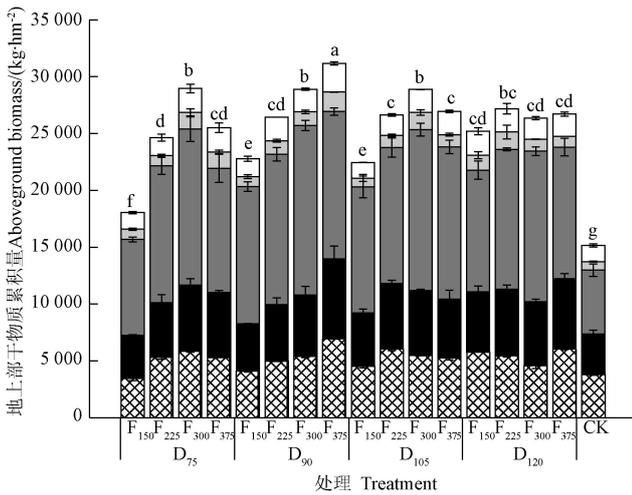
2.2 不同水肥处理对春玉米地上部干物质累积的影响

地上部干物质质量可以反映作物生长情况, 往往很大程度上能影响产量的多少^[25]。由图 2 可知, 与 CK 处理相比, 施肥能明显地提高春玉米地上部干物质累积量。2016年 $D_{105}F_{240}$ 处理下的地上部干物质累积量值最大, 达到 26 513 kg/hm², 与 $D_{75}F_{240}$ 和 $D_{90}F_{180}$ 处理相比分别提高了

16.74%和 16.88% ($P<0.05$)，与 $D_{120}F_{180}$ 和 $D_{120}F_{240}$ 处理无显著差异 ($P>0.05$)；2017 年 $D_{90}F_{375}$ 处理下的地上部干物质累积量值最大，达到 $31\ 165\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，与 $D_{75}F_{300}$ 、 $D_{105}F_{300}$ 和 $D_{120}F_{225}$ 处理相比分别提高了 7.63%、7.92%和 14.65% ($P<0.05$)。



a. 2016 年
a. In 2016



b. 2017 年
b. In 2017

注：不同字母表示同一灌水水平下，不同施肥处理间地上部干物质累积总量差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different letters indicate total aboveground biomass among fertilization treatments is significantly different under the same irrigation level ($P<0.05$).

图 2 2016 年和 2017 年不同水肥处理对春玉米地上部干物质累积量的影响

Fig.2 Effects of different water and fertilizer treatments on aboveground biomass of spring maize in year of 2016 and 2017

总体看来，2016 年成熟期地上部干物质质量整体呈现出 F_{180} 、 F_{240} 处理高于 F_{60} 、 F_{120} 处理，但 2017 年随着施肥量的增加，地上部干物质质量呈现出先增加后减小的趋势 ($D_{90}F_{375}$ 和 $D_{120}F_{375}$ 处理除外)。春玉米成熟期地上部干物质累积量主要集中在籽粒中，2016 年 $D_{120}F_{180}$ 处理下的籽粒地上部干物质质量最大，为 $12\ 691\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，占地上部干物质总累积量的比例为 48.35%，与 $D_{120}F_{240}$ 和 $D_{105}F_{240}$ 处理无显著性差异 ($P>0.05$)；2017 年 $D_{90}F_{300}$ 处理下的籽粒干物质质量最大，为 $14\ 912\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，占地上

部干物质总累积量的比例为 51.61%，相比于 $D_{90}F_{375}$ 处理下的籽粒干物质质量增加了 14.99% ($P<0.05$)，与所占地上部干物质累积量的比例平均增长了 10.00% ($P<0.05$)。说明株高偏高虽然增大了营养器官的干物质累积量，却影响到了籽粒干物质的积累，使得籽粒所占总干物质的比例减小，降低作物产量。因此，合理的水肥供应对提高作物产量尤为重要。

2.3 不同水肥处理对春玉米产量及产量构成要素的影响

由表 3 可知，施肥能显著地提高玉米籽粒的产量，不同的灌水量和施肥量对玉米籽粒的产量及其产量构成要素有不同程度的影响。2 a 试验结果表明，灌水量对产量及其构成要素的影响低于施肥量的影响。施肥量对产量及其产量构成要素均有极显著影响 ($P<0.01$)，灌水量对行粒数和产量有极显著影响 ($P<0.01$)，水肥的交互作用对产量构成要素有极显著影响 (2016 年灌水量和施肥量交互作用对穗粗的影响除外) ($P<0.01$)，对产量有显著影响 ($P<0.05$)。

总体看来，在 2016 年低肥梯度水平和相同灌水水平条件下，春玉米籽粒产量随施肥量的增加而增加，而当 2017 年相应的增加施肥量后，籽粒的产量随施肥量增加先增加后减小。以 D_{90} 和 D_{105} 灌水水平为例，2016 年，在相同灌水水平条件下， F_{240} 处理的产量虽然与 F_{180} 处理无显著差异 ($P>0.05$)，但显著高于其他处理 ($P<0.05$)，而在 2017 年相同灌水条件下， F_{300} 处理籽粒产量显著高于其他处理 ($P<0.05$)。另外，2016 年， $D_{105}F_{180}$ 处理在产量方面有着明显的优势，该处理在 $N-P_2O_5-K_2O$ 施肥量减少 $60-30-30\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，灌水量减少 $82\ \text{mm}$ 的情况下，仍与最高产量 $D_{120}F_{240}$ 处理产量 ($14\ 400\ \text{kg}/\text{hm}^2$) 无显著差异 ($P>0.05$)。但 2017 年相应增加施肥量后， $D_{90}F_{300}$ 处理产量最高，为 $16\ 884\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ，并显著高于其他处理 ($P<0.05$)，比 $D_{75}F_{300}$ 、 $D_{105}F_{300}$ 和 $D_{120}F_{300}$ 处理分别提高了 11.00%、7.32%和 13.85% ($P<0.05$)。

2.4 不同水肥处理对春玉米 WUE、IWUE 及 PFP 的影响

由表 4 可知，灌水量是造成耗水量 (ET) 差异的主要原因，并且与 ET 正相关。由于 2017 年降雨量大于 2016 年，造成 2017 年 ET 普遍高于 2016 年。2 a 试验表明灌水对 ET 有显著影响 ($P<0.05$)，但随着灌水量的增加，各施肥处理间的 ET 无显著影响 ($P>0.05$)。

由表 4 可知，2016 年 D_{75} 灌水水平下， F_{180} 处理的 WUE 显著高于 F_{120} 和 F_{240} 处理 ($P<0.05$)， D_{90} 灌水水平下， F_{240} 处理的 WUE 显著高于 F_{180} 处理 ($P<0.05$)， D_{105} 、 D_{120} 灌水水平下， F_{180} 处理的 WUE 显著高于 F_{120} 处理 ($P<0.05$)，与 F_{240} 处理无显著差异 ($P>0.05$)；2017 年相同灌水水平下， F_{300} 处理均显著高于 F_{225} 处理和 F_{375} 处理 (D_{105} 和 D_{120} 灌水水平下， F_{300} 处理的 WUE 与 F_{375} 处理无显著差异)。总体看来，灌水量和施肥量单因素或交互作用对 WUE 和 IWUE 均有显著性影响 ($P<0.05$)，在 2016 年低肥梯度水平和相同灌水水平条件下，WUE 和 IWUE 均随施肥量增加而增加 (D_{75} 和 D_{90} 灌水处理 WUE 除外)，而当 2017 年相应的增加施肥量后，WUE

随施肥量的增加先增加后减小。

肥料偏生产力(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。在相同的灌水水平中,PFP与肥料的施用量成反比。总体看来,灌水量和施肥量单因素或交互作用对PFP均有极显著影响($P<0.01$)。2016年D₁₂₀F₂₄₀与D₁₀₅F₁₈₀产量无显著差异($P>0.05$),但PFP却显著低于D₁₀₅F₁₈₀处理($P<0.05$);2017年产量

最高处理(D₉₀F₃₀₀)相对应的PFP为28.14 kg/kg,与D₇₅F₂₂₅和D₁₀₅F₂₂₅处理无显著性差异($P>0.05$)。2016年D₁₀₅F₁₈₀处理的PFP值与D₇₅F₂₄₀、D₉₀F₂₄₀、D₁₀₅F₂₄₀和D₁₂₀F₂₄₀处理相比,分别提高了57.28%、46.02%、31.89%和27.77% ($P<0.05$);2017年D₉₀F₃₀₀处理的PFP值与D₇₅F₃₀₀、D₁₀₅F₃₀₀和D₁₂₀F₃₀₀处理相比,分别提高了11.00%、7.32%和13.88% ($P<0.05$)。

表3 2016和2017年不同水肥处理对春玉米产量及产量构成要素的影响

Table 3 Effects of different water and fertilizer treatments on yield and yield components of spring maize in year of 2016 and 2017

2016年								2017年							
灌水水平 Irrigation level	施肥水平 Fertilization level	穗长 Ear length/cm	穗粗 Ear diameter/mm	行粒数 Kernel number per row	秃尖长 Bald ear length/cm	百粒质量 hundred-grain weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	灌水水平 Irrigation level	施肥水平 Fertilization level	穗长 Ear length/cm	穗粗 Ear diameter/mm	行粒数 Kernel number per row	秃尖长 Bald ear length/cm	百粒质量 hundred-grain weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
D ₇₅	F ₆₀	15.87hi	47.92abc	28.00g	2.67bc	25.29f	8 700i	D ₇₅	F ₁₅₀	15.03i	48.61d	31.83gh	2.18bcdef	28.26g	9 868g
	F ₁₂₀	16.10ghi	53.18ab	33.5cdef	2.41c	29.88cde	9 450h		F ₂₂₅	15.80h	50.83c	32.50fg	2.80abcd	35.45b	13 324ef
	F ₁₈₀	17.38efg	51.27ab	35.75abc	2.37c	30.98abc	11 250fg		F ₃₀₀	17.60cd	53.93a	38.00bcd	0.95g	36.49a	15 210bc
	F ₂₄₀	17.63ef	52.07ab	36.75ab	1.99d	33.05a	11 700ef		F ₃₇₅	18.13bc	53.67a	37.00cde	1.9ef	35.24b	12 376f
D ₉₀	F ₆₀	16.25ghi	51.11ab	27.38g	2.60c	28.06e	9 900h	D ₉₀	F ₁₅₀	18.42ab	50.42cd	34.66ef	3.05ab	31.58de	13 930de
	F ₁₂₀	17.00efgh	51.43ab	32.25def	1.50efgh	30.51bcd	10 650g		F ₂₂₅	16.32fgh	51.37bc	34.66ef	1.88ef	33.79c	14 760bcd
	F ₁₈₀	19.25cde	50.64ab	33.87cde	1.85de	28.17e	12 300de		F ₃₀₀	18.68ab	53.15ab	39.5ab	0.95g	37.40a	16 884a
	F ₂₄₀	18.13cde	51.43ab	32.25def	1.50efgh	30.51bcd	12 600cd		F ₃₇₅	19.07a	54.18a	41.00a	1.28fg	32.40d	15 060bcd
D ₁₀₅	F ₆₀	16.38fgh	46.18bc	30.75f	2.98b	28.58de	11 100fg	D ₁₀₅	F ₁₅₀	16.13gh	50.62cd	30.00h	1.95def	30.71e	12 400f
	F ₁₂₀	18.00de	51.11ab	32.13def	1.45gh	31.43abc	13 050bc		F ₂₂₅	14.18j	45.83e	32.16fgh	2.1cdef	29.41f	13 500ef
	F ₁₈₀	19.25bcd	50.64ab	33.87cde	1.56efg	29.66cde	13 800a		F ₃₀₀	17.60cd	53.80a	36.16de	3.03ab	32.48d	15 733b
	F ₂₄₀	19.38bc	48.72abc	35.00abcd	1.18h	29.45cde	13 950a		F ₃₇₅	19.17a	53.11ab	40.83a	0.83g	34.65bc	14 420cde
D ₁₂₀	F ₆₀	15.00i	47.61abc	26.25gh	2.32c	27.91e	11 400f	D ₁₂₀	F ₁₅₀	16.72efg	50.03cd	32.33fgh	2.21bcde	30.65e	12 530f
	F ₁₂₀	18.25cde	50.00abc	33.75cde	1.81def	30.76bcd	13 650ab		F ₂₂₅	18.50ab	51.99abc	39.16abc	1.38efg	32.19d	13 470ef
	F ₁₈₀	21.25a	45.86bc	36.75a	1.93d	32.27ab	14 250a		F ₃₀₀	17.32de	51.41bc	33.33fg	2.85abc	30.88e	14 830bcd
	F ₂₄₀	19.75b	52.87ab	34bcde	1.47fgh	30.61bcd	14 400a		F ₃₇₅	16.92def	51.27bc	37.83bcd	0.96g	31.49de	13 350ef
CK		13.50g	42.77c	24.00h	3.48a	22.72g	6 300j	CK		12.43k	41.21f	24.33i	3.25a	24.71h	6 213h

ANOVA 检验 F 值 F value of ANOVA

灌水水平 Irrigation level	0.68	1.06	10.81**	15.79**	1.48	9.13**	43.81**	3.04	14.93**	0.60	7.94**	48.19**
施肥水平 Fertilization level	83.45**	3.66*	65.55**	126.17**	56.89**	376.41**	168.87*	83.50**	99.67**	14.91**	170.81**	173.54**
灌水水平×施肥水平 Irrigation level ×Fertilization level	4.88**	0.85	3.84**	6.49**	5.36**	2.55*	26.28**	7.22**	10.19**	8.94**	36.48**	3.35*

表4 2016和2017年不同水肥处理对水分利用效率(WUE)、灌溉水利用效率(IWUE)及肥料偏生产力(PFP)的影响

Table 4 Effects of different water and fertilizer treatments on water use efficiency, irrigation water use efficiency and partial factor productivity in year of 2016 and 2017

2016年						2017年					
灌水水平 Irrigation level	施肥水平 Fertilization level	耗水量 Evapotranspiration/mm	WUE /(kg·m ⁻³)	IWUE /(kg·m ⁻³)	PFP /(kg·kg ⁻¹)	灌水水平 Irrigation level	施肥水平 Fertilization level	耗水量 Evapotranspiration/mm	WUE /(kg·m ⁻³)	IWUE /(kg·m ⁻³)	PFP /(kg·kg ⁻¹)
D ₇₅	F ₆₀	438g	1.95gh	2.69ef	72.50c	D ₇₅	F ₁₅₀	561e	1.76h	3.12fg	34.03c
	F ₁₂₀	445g	1.99fgh	2.92cd	39.37f		F ₂₂₅	591de	2.25de	4.21b	29.94d
	F ₁₈₀	473f	2.56a	3.48a	31.25gh		F ₃₀₀	589de	2.60ab	4.81a	25.35f
	F ₂₄₀	481ef	2.42b	3.62a	24.37j		F ₃₇₅	591de	2.09ef	3.91c	16.84h
D ₉₀	F ₆₀	508de	1.92gh	2.45gh	82.50b	D ₉₀	F ₁₅₀	608d	2.29cd	3.50de	48.03a
	F ₁₂₀	515d	2.01fgh	2.63f	44.37e		F ₂₂₅	652bc	2.26de	3.71cd	33.17c
	F ₁₈₀	528cd	2.25cd	3.04bc	34.17g		F ₃₀₀	627cd	2.69a	4.24b	28.14de
	F ₂₄₀	545c	2.48ab	3.11b	26.25ij		F ₃₇₅	614d	2.45bc	3.79c	20.49g
D ₁₀₅	F ₆₀	582b	1.88h	2.29h	92.50a	D ₁₀₅	F ₁₅₀	670b	1.85gh	2.66hi	42.76b
	F ₁₂₀	584b	2.21de	2.69ef	54.37d		F ₂₂₅	660bc	2.04f	2.89gh	30.34d
	F ₁₈₀	588b	2.36bc	2.84de	38.33f		F ₃₀₀	681b	2.29cd	3.37ef	26.22ef
	F ₂₄₀	591b	2.39b	2.88cd	29.06hi		F ₃₇₅	679b	2.12def	3.09g	19.62g
D ₁₂₀	F ₆₀	669a	1.68i	2.01i	95.00a	D ₁₂₀	F ₁₅₀	721a	1.74h	2.32j	43.20b
	F ₁₂₀	673a	2.03fg	2.41gh	56.87d		F ₂₂₅	748a	1.80gh	2.49ij	30.27d
	F ₁₈₀	678a	2.11ef	2.52fg	39.58f		F ₃₀₀	758a	1.95fg	2.74hi	24.71f
	F ₂₄₀	681a	2.11ef	2.54fg	30.00h		F ₃₇₅	741a	1.80gh	2.47ij	18.16gh
CK		680a	0.93j	1.11j		CK		750a	0.85i	1.16k	

ANOVA 检验 F 值 F value of ANOVA

灌水水平 Irrigation level	4.51*	15.30**	6.07*	8.97**	3.87*	55.97**	17.72**	46.10**
施肥水平 Fertilization level	0.6	13.29**	10.65**	417.22**	2.37	47.31**	69.35**	20.50**
灌水水平×施肥水平 Irrigation level ×Fertilization level	2.75	6.95**	4.75**	12.67**	1.07	5.35**	8.46**	8.10**

2.5 基于春玉米产量和 WUE 的水肥管理方案优化

考虑 2 a 施肥水平和灌水量的不同，因此将 2 a 试验结果进行综合分析：分别以春玉米产量、WUE 和 PFP 为因变量，以灌水量和施肥量为自变量，基于最小二乘法，运用 Mathematica 9.0 对数据进行回归分析，结果如表 5 所示。当产量达到最大值时，灌水量为 446 mm，施肥量 (N-P₂O₅-K₂O) 为 325-163-163 kg/hm²；当 WUE 达到最大值时，灌水量为 349 mm，施肥量 (N-P₂O₅-K₂O) 为 297-149-149 kg/hm²；当 PFP 达到最大值时，灌水量为 541 mm，施肥量 (N-P₂O₅-K₂O) 为 60-30-30 kg/hm²；可见，相同的灌水施肥条件下，很难同时满足产量、WUE 和 PFP 均达到最大值。进一步分析考虑将三者最大值 95%、90%、85% 和 80% 的置信区间为可接受性对三者同时进行优化处理发现，随着置信区间的增加，产量和 WUE 所重叠的阴影区域也逐渐增加，由于 PFP 与产量和 WUE 变化规律相反，使得 PFP 最大值 95%、90%、85% 和 80%

的置信区间与产量和 WUE 的置信区间均无重叠区域，若继续增大优化区间，优化结果会大大减小产量和 WUE，不符合现实高产与节水目标，故单独考虑产量与 WUE 的优化，计算当产量和 WUE 分别达到最大值的 95% 置信区间内时所需要的灌水量和施肥量，结果如图 3 所示，当灌水量在 323~460 mm，施肥量 (N-P₂O₅-K₂O) 在 210-104-104~412-205-205 kg/hm² 时，产量和 WUE 均能同时达到最大值的 95% 以上。然而灌水量在 446~460 mm，施肥量 (N-P₂O₅-K₂O) 在 325-163-163~412-205-205 kg/hm² 时，产量和 WUE 虽然能同时达到最大值的 95% 以上，但产量呈下降趋势。以最大产量和最大 WUE 的 95% 为置信区间，兼顾节水节肥的目标，选择优化区间为：灌水量在 323~446 mm，施肥量 (N-P₂O₅-K₂O) 在 210-104-104~325-163-163 kg/hm²。此时，PFP (22.81~33.74 kg/kg)，约为 PFP 最大值的 30%。

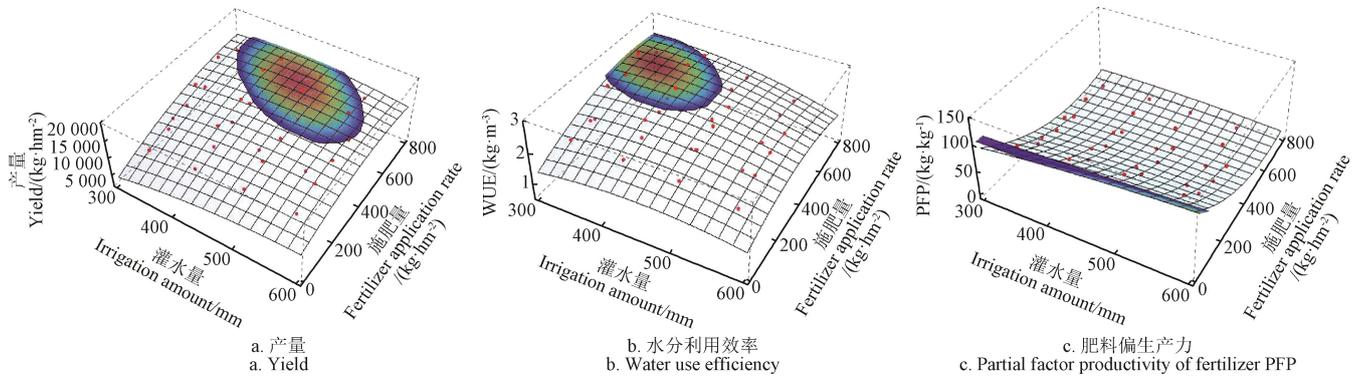
表 5 水肥供应与春玉米产量、水分利用效率和肥料偏生产力的回归关系

Table 5 Regression equations between water and fertilizer inputs and spring maize yield, water use efficiency and partial factor productivity

因变量 z Dependent variable	回归方程 Regression equation	R ²	z 最大时处理组合 Combination of treatment for max z		
			x/mm	y/(kg·hm ⁻²)	z _{max}
产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	$z = -11917.525 + 72.999x - 0.061x^2 + 32.143y - 0.028102xy - 0.015041y^2$	0.76**	446	325-163-163	14 850
水分利用效率 WUE/(kg·m ⁻³)	$z = -0.645 + 0.009985x - 0.000011x^2 + 0.004474y - 0.000004xy - 0.000003y^2$	0.56**	349	297-149-149	2.43
肥料偏生产力 PFP/(kg·kg ⁻¹)	$z = 34.974 + 0.247x - 0.00016x^2 - 0.211y - 0.00017xy + 0.00023y^2$	0.94**	541	60-30-30	87.54

注：x 和 y 分别代表灌水量和 N-P₂O₅-K₂O 施肥量。

Note: x and y represent amount of irrigation water and N-P₂O₅-K₂O fertilizer application rate, respectively.



注：图中圆的散点代表 2 a 实测值，阴影区域分别代表产量、WUE 最大值 95% 的置信区间和肥料偏生产力最大值 80% 的置信区间。

Note: The circular dotted points in the figure represent the 2-yr measured values, and the shadow regions represent 95% confidence interval of maximal yield and WUE and 80% confidence interval of maximal partial factor productivity of fertilizer, respectively.

图 3 产量、水分利用效率和肥料偏生产力与灌水量和施肥量的关系

Fig.3 Relationships between yield, water use efficiency and partial factor productivity of fertilizer and irrigation amount and fertilizer application rate

3 讨论

3.1 不同水肥供应对春玉米生长、地上部总干物质量和产量的影响

土壤水分是土壤养分释放的基础，施肥能提高作物的水分利用效率，适宜的水肥供应对作物的生长和增产具有显著的正耦合效应^[26-27]，但肥料供应过多会使作物“徒长”，对产量形成不利^[28-29]。本研究发现 2016 年 75%ET_c~105%ET_c 和 2017 年 75%ET_c~90%ET_c 灌水水

平下，株高随施肥量的增加呈先增加后趋于平稳，而在 2016 年 120%ET_c 和 2017 年 105%ET_c 灌水水平下，株高随施肥量增加先增加后减小；2 a 试验相同施肥处理下，除 2016 年 D₁₂₀F₆₀ 处理茎粗值显著高于 D₉₀F₆₀ 和 D₁₀₅F₃₀₀ 处理和 2017 年 D₁₀₅F₃₀₀ 处理茎粗值显著低于 D₁₂₀F₃₀₀ 处理，其余处理均无显著性差异。相同灌水处理下，2017 年的株高、茎粗、LAI 指数和地上部干物质累积量普遍高于 2016 年，这可能是因为 2016 年降雨量和施肥梯度较小，不能有效

地满足该地区春玉米的生长。2 a 试验 2016 年 $D_{120}F_{240}$ 处理和 2017 年 $D_{120}F_{375}$ 处理 LAI 值最大, 并显著高于 2016 年 F_{120} 处理 ($D_{120}F_{120}$ 处理除外) 和 2017 年 F_{150} 处理, 说明 LAI 和株高并不是随施肥量的增加而线性增加的。2016 年试验中, $D_{105}F_{180}$ 处理的籽粒产量与 $D_{120}F_{240}$ 处理无显著性差异 ($P>0.05$), 但显著高于 $D_{90}F_{240}$ 处理 ($P<0.05$), 2017 年试验中, $D_{90}F_{300}$ 处理的籽粒产量显著高于其他处理 ($P<0.05$)。这与邹海洋等^[6]得出的膜下滴灌条件下 $90\%ET_c \sim 100\%ET_c$ 灌水水平、180-90-90(N-P₂O₅-K₂O) kg/hm² 施肥水平下产量最高, 郭金等^[30] 180 kg/hm² 施氮量下玉米的株高、茎粗、LAI 值最大的结论不尽相同, 这可能与试验土壤质地, 灌水量或施肥量、试验材料品种和种植密度不同有关。本研究中, $90\%ET_c$ 灌水水平和 300-150-150 (N-P₂O₅-K₂O) 施肥水平下的产量最高, 但株高、LAI 和地上部干物质累积量却没有取得最大值, 2017 年试验中 $D_{120}F_{375}$ 处理的株高值取得最大, $D_{90}F_{375}$ 处理的地上部干物质累积量取得最大, 均显著高于 $D_{90}F_{300}$ 处理 ($P<0.05$), 但 $D_{90}F_{300}$ 处理下籽粒干物质累积量占地上部干物质总累积量的比例相比于 $D_{90}F_{375}$ 处理下的籽粒干物质质量增加了 14.99% ($P<0.05$), 与所占地上部干物质累积量的比例平均增加了 10.00% ($P<0.05$), 表明增加水肥供应虽然会增加春玉米的株高和 LAI, 但若水肥供应过多同样会减小籽粒干物质质量, 降低地上部干物质质量, 使得产量减少; $D_{120}F_{375}$ 处理的茎粗值和 LAI 值取得最大, 但产量显著低于 $D_{90}F_{300}$ 处理 ($P<0.05$)。因此, 在滴灌施肥条件下, 灌水量和施肥量的合理配比应被重点考虑。

3.2 不同水肥供应对春玉米 WUE、PFP 的影响及优化水肥管理方案

邵国庆等^[31]认为在相同灌水条件下, 增加施氮量能显著提高玉米的水分利用效率; Alkansi 等^[32]研究发现灌水量和施氮量对 WUE 均有显著性影响。本研究中得到与之相似的结果, 在 2017 年高肥梯度同一灌水水平下, WUE 值随施肥量增加先增加后减小, 当施肥量 (N-P₂O₅-K₂O) 达到 300-150-150 kg/hm² 时, WUE 达到最大值, 比较该施肥条件下的各灌水水平, $D_{120}F_{300}$ 处理 WUE 值最低。在 2a 试验中, $D_{90}F_{300}$ 处理 (2017 年) 的产量最高, WUE 分别显著高于 $D_{120}F_{240}$ 处理和 $D_{120}F_{375}$ 处理 ($P<0.05$), 说明适宜的灌水量和施肥量能增加 WUE, 选取合适的中水高肥处理, 达到“以肥调水”的效果。

施肥和灌水对棉花^[33-34]、番茄^[35]和马铃薯^[36]等作物 PFP 均有极显著的影响 ($P<0.01$), 在同一灌水水平下, 随施肥量的增加 PFP 显著下降 ($P<0.05$)。本研究结果与之相似, 在 2016 试验处理中 $D_{105}F_{60}$ 处理的 PFP 与 $D_{120}F_{60}$ 处理无显著性差异 ($P>0.05$), 但显著高于其他处理 ($P<0.05$); 2017 年试验处理中, $D_{90}F_{150}$ 处理下的 PFP 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 但产量却显著低于最高产量处理 ($P<0.05$), 从追求高产目标来说, 该灌水水平和施肥水平的组合并不合理。

本论文在优化水肥管理方案时, 考虑到 PFP 最大值

80%置信区间与产量和 WUE 无重叠区域, 继续增加优化区间会导致产量和 WUE 大大减小, 故先基于产量和 WUE 对水肥管理方案进行优化, 分析产量、WUE 与灌水量、施肥量之间的关系, 考虑最大值 95%的置信区间为可接受性, 并保证区间内产量为非递减趋势, 得出灌水量在 323~446 mm, N-P₂O₅-K₂O 施肥量在 210-104-104~325-163-163 kg/hm² 时, 优化区间所得到的 PFP 在 22.81~33.74 kg/kg, 产量和 WUE 均能达到最大值的 95%以上。本优化是基于 2 a 的试验结果, 2 a 降雨量差异较大, 不同年份的气象差异可能会使得试验结果及优化区间有所不同, 优化的结果还需进一步的田间试验验证。

4 结论

本文研究不同滴灌水肥供应对宁夏春玉米生长、产量及水肥利用效率的影响, 结果表明:

1) 灌水量和施肥量对玉米株高、茎粗、叶面积指数都有显著和极显著的影响; 在 2016 年低肥梯度水平下, 灌水量和施肥量对干物质累积有显著的影响, 其中 $D_{120}F_{180}$ 处理籽粒干物质最大为 12 691 kg/hm², 在 2017 年高肥梯度水平下, 随着灌水量和施肥量的增加, 地上部干物质累积量有先增加后减小的趋势 ($D_{90}F_{375}$ 和 $D_{120}F_{375}$ 处理除外), $D_{90}F_{300}$ 处理下籽粒干物质累积量最大为 14 912 kg/hm²。

2) 在低肥梯度的 2016 年, 灌水量和施肥量的交互作用对春玉米产量有显著影响, 而在高肥梯度的 2017 年, 春玉米产量随灌水量和施肥量的增加呈现先增加后减小的趋势, 灌水量和施肥量对玉米水分利用效率、灌溉水分利用效率和肥料偏生产力都有显著和极显著的影响。基于春玉米产量、水分利用效率和肥料偏生产力优化水肥管理方案, 考虑区间内产量为非递减趋势得出灌水量在 323~446 mm, N-P₂O₅-K₂O 施肥量在 210-104-104~325-163-163 kg/hm² 时, 所得到的 PFP 为 22.81~33.74 kg/kg, 产量和水分利用效率均能达到最大值的 95%以上, 为适宜的滴灌施肥区间。该研究结果对宁夏春玉米滴灌施肥管理具有重要指导意义。

[参 考 文 献]

- [1] 宁夏水文水资源勘测局. 宁夏水资源公报[R]. 银川: 宁夏回族自治区水利厅, 2012: 27.
- [2] Pereira L S, Gonçalves J M, Dong B, et al. Assessing basin irrigation and scheduling strategies for saving irrigation water and controlling salinity in the upper Yellow River Basin, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 93(3): 109-122.
- [3] 赵如浪, 杨滨齐, 王永宏, 等. 宁夏高产玉米群体产量构成及生长特性研究[J]. *玉米科学*, 2014, 22(3): 60-66. Zhao Rulang, Yang Binqi, Wang Yonghong, et al. Yield structure and growth characteristics of high yield maize population in Ningxia[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(3): 60-66. (in Chinese with English abstract)
- [4] Fan Junliang, Wu Lifeng, Zhang Fucang, et al. Evaluation of drip fertigation uniformity affected by injector type, pressure difference and lateral layout[J]. *Irrigation and Drainage*, 2017, 66(4): 520-529.
- [5] Ibrahim M M, Elbaroudy A A, Taha A M. Irrigation and fertigation scheduling under drip irrigation for maize crop in

- sandy soil[J]. *International Agrophysics*, 2016, 30(1): 47—55.
- [6] 邹海洋, 张富仓, 张雨新, 等. 适宜滴灌施肥量促进河西春玉米根系生长提高产量[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 145—155.
Zou Haiyang, Zhang Fucang, Zhang Yuxin, et al. Optimal drip irrigation and fertilization amount enhancing root growth and yield of spring maize in Hexi region of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(21): 145—155. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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(3): 563—568.
Sun Wentao, Sun Zhanxiang, Wang Congxiang, et al. Coupling effect of water and fertilizer on corn yield under drip fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(3): 563—568. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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.
Guo Bingyu, Gao Hui, Tang Cheng, et al. Response of water coupling with N supply on maize nitrogen uptake, water and N use efficiency, and yield in drip irrigation condition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(12): 3679—3686. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘洋, 栗岩峰, 李久生. 东北黑土区膜下滴灌施氮管理对玉米生长和产量的影响[J]. *水利学报*, 2014, 45(5): 529—536.
Liu Yang, Li Yanfeng, Li Jiusheng. Effects of nitrogen management on the growth and yield of mulched and drip-irrigated maize in Northeast Black Soil Regions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(5): 529—536. (in Chinese with English abstract)
- [10] Sui Juan, Wang Jiandong, Gong Shihong, et al. Assessment of maize yield-increasing potential and optimum N level under mulched drip irrigation in the northeast of China[J]. *Field Crops Research*, 2018, 215: 132—139.
- [11] 高聚林, 王志刚, 孙继颖, 等. 青贮玉米对氮磷钾的吸收规律[J]. *作物学报*, 2006, 32(3): 363—368.
Gao Julin, Wang Zhigang, Sun Jiying, et al. Nitrogen phosphorus and potassium absorption in ensilage maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 363—368. (in Chinese with English abstract)
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [13] 谷晓博, 李援农, 银敏华, 等. 降解膜覆盖对油菜根系、产量和水分利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 184—193.
Gu Xiaobo, Li Yuannong, Yin Minhua, et al. Effects of biodegradable film mulching on root distribution, Yield and water use efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus L.*)[J]. *Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 184—193. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 78—84.
Zhang Ruifu, Yang Hengshan, Gao Julin, et al. Effect of subsoiling on root morphological and physiological characteristics of spring maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(5): 78—84. (in Chinese with English abstract)
- [15] Sullivan W M, Jiang Z C, Hull R J. Root morphology and its relationship with nitrate uptake in Kentucky bluegrass[J]. *Crop Science*, 2000, 40(3): 765—772.
- [16] 范军亮, 张富仓, 吴立峰, 等. 滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性综合评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 96—101.
Fan Junliang, Zhang Fucang, Wu Lifeng, et al. Field evaluation of fertigation uniformity in drip irrigation system with pressure differential tank[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(12): 96—101. (in Chinese with English abstract)
- [17] 靳立斌, 张吉旺, 李波, 等. 高产高效夏玉米的冠层结构及其光合特性[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(12): 2430—2439.
Jin Libin, Zhang Jiawang, Li Bo, et al. Canopy structure and photosynthetic characteristics of high yield and high nitrogen efficiency summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(12): 2430—2439. (in Chinese with English abstract)
- [18] 麻雪艳, 周广胜. 玉米叶面积指数动态模拟的最适野外观测资料[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1579—1585.
Ma Xueyan, Zhou Guangsheng. Optimum field observation data for simulating maize leaf area index[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(6): 1579—1585. (in Chinese with English abstract)
- [19] Eberbach P, Pala M. Crop row spacing and its influence on the partitioning of evapotranspiration by winter-grown wheat in Northern Syria[J]. *Plant & Soil*, 2005, 268(1): 195—208.
- [20] Oweis T Y, Farahani H J, Hachum A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1239—1248.
- [21] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(10): 1966—1975.
Chen Jing, Wang Yingchun, Li Hu, et al. Effects of drip fertigation with no-tillage on water use efficiency and yield of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10): 1966—1975. (in Chinese with English abstract)
- [22] Ierna A, Pandino G, Lombardo S, et al. Tuber yield, water and fertilizer productivity in early potato as affected by a combination of irrigation and fertilization[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 101(1): 35—41.
- [23] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 537—541.
Wang Xiqun, Ma Luyi, Jia Zhongkui, et al. Research and application advances in leaf area index(LAI)[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5): 537—541. (in Chinese with English abstract)
- [24] 麻雪艳, 周广胜. 春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用[J]. *生态学报*, 2013, 33(8): 2596—2603.
Ma Xueyan, Zhou Guangsheng. Method of determining the maximum leaf area index of spring maize and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2596—2603. (in Chinese with English abstract)
- [25] 夏方山, 毛培胜, 闫慧芳, 等. 植物花后光合性能与物质转运的研究进展[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 420—427.
Xia Fangshan, Mao Peisheng, Yan Huifang, et al. Photosynthetic performance and material transport of post-anthesis plants (Review)[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(3): 420—427. (in Chinese with English abstract)
- [26] 马强, 宇万太, 沈善敏, 等. 旱地农田水肥效应研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 665—673.
Ma Qiang, Yu Wantai, Shen Shanmin, et al. Research advances in water fertilizer effect on dry land farm[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(3): 665—673. (in Chinese with English abstract)
- [27] Hammad H M, Ahmad A, Wajid A, et al. Maize response to time and rate of nitrogen application[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2011, 43(4): 1935—1942.
- [28] Nakamura K, Harter T, Hirono Y, et al. Assessment of root zone nitrogen leaching as affected by irrigation and nutrient management practices[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(4): 1353—1366.
- [29] Wang Yanzhe, Zhang Xiying, Liu Xiuwei, et al. The effects of nitrogen supply and water regime on instantaneous WUE, time-integrated WUE and carbon isotope discrimination in winter wheat[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144(1): 236—244.

- [30] 郭金金, 张富仓, 王海东, 等. 不同施氮量下缓释氮肥与尿素掺混对玉米生长与氮素吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(20): 3930—3943.
Guo Jinjin, Zhang Fucang, Wang Haidong, et al. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth and nitrogen uptake under different nitrogen application rates[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(20): 3930—3943. (in Chinese with English abstract)
- [31] 邵国庆, 李增嘉, 宁堂原, 等. 灌溉和尿素类型对玉米水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 58—63.
Shao Guoqing, Li Zenjia, Ning Tangyuan, et al. Effects of irrigation and urea types on water use efficiency of maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 58—63. (in Chinese with English abstract)
- [32] Alkansi M M, Yin X. Effects of nitrogen rate, Irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(6): 1475—1482.
- [33] 吴立峰, 张富仓, 周罕觅, 等. 不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 137—146.
Wu Lifeng, Zhang Fucang, Zhou Hanmi, et al. Effects of drip irrigation and fertilizer application on water use efficiency and cotton yield in North of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(20): 137—146. (in Chinese with English abstract)
- [34] Wang Haidong, Wu Lifeng, Cheng Minghui, et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang, China[J]. Field Crops Research, 2018, 219: 169—179.
- [35] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 70—80.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Zhang Yan, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(21): 70—80. (in Chinese with English abstract)
- [36] 张富仓, 高月, 焦婉如, 等. 水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 270—278.
Zhang Fucang, Gao Yue, Jiao Wanru, et al. Effects of water and fertilizer supply on growth, water and nutrient use efficiencies of potato in sandy soil of Yulin Area[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 270—278. (in Chinese with English abstract)

Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia

Zhang Fucang¹, Yan Fulai¹, Fan Xingke², Li Guodong¹, Liu Xiang¹, Lu Junsheng¹, Wang Ying¹, Ma Weiqing²

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To explore the effects of different drip irrigation and fertilization levels on spring maize yield as well as water-fertilizer use efficiency, a 2-yr field experiment was carried out in the Water-saving Science and Technology District of Ningxia in 2016 to 2017. The spring maize variety of “Xianyu 335” was planted. There were 4 irrigation levels (75%ET_c, 90%ET_c, 105%ET_c and 120%ET_c, where ET_c is the crop evapotranspiration) and 4 N-P₂O₅-K₂O fertilization levels including 60-30-30 kg/hm², 120-60-60 kg/hm², 180-90-90 kg/hm², 240-120-120 kg/hm² in 2016, and 150-70-70 kg/hm², 225-110-110 kg/hm², 300-150-150 kg/hm², 375-180-180 kg/hm² in 2017. A control treatment with fully irrigated (120%ET_c) with no fertilization was also set up. There were 17 treatments in total. The plant height, stem diameter, leaf area index (LAI), aboveground biomass and grain yield of spring maize were measured. The water use efficiency (WUE), irrigation water use efficiency (IWUE) and partial factor productivity of fertilizer (PFP) were also calculated. The 2-yr results showed that the single factor of irrigation and fertilization had significant or extremely significant effects on the plant height, stem diameter and LAI. Irrigation and fertilization had a significant coupling effect on the plant height of spring maize. The effects of irrigation and fertilization on the aboveground biomass at maturity varied with the fertilizer gradients. With low fertilizer application rate in 2016, the irrigation and fertilization treatments had significant effects on the aboveground biomass, with the maximum of 12 691 kg/hm² in the treatment of irrigation 120%ET_c and N-P₂O₅-K₂O application rate of 180-90-90 kg/hm². With the high fertilizer application rate in 2017, the aboveground biomass of 75%ET_c and 105%ET_c were first increased and then decreased with the increase in the irrigation amount and fertilizer application rate, reaching the maximum of 14 912 kg/hm² in the treatment of 90%ET_c and N-P₂O₅-K₂O application rate of 300-150-150 kg/hm². Irrigation and fertilization had a significant effect on the grain yield of spring maize in 2016, with the maximum of 14 400 kg/hm² in the treatment of 120%ET_c and N-P₂O₅-K₂O application rate of 240-120-120 kg/hm². The grain yield in 2017 reached the maximum of 16 884 kg/hm² in the treatment of 90%ET_c and N-P₂O₅-K₂O application rate of 300-150-150 kg/hm². In 2016, the WUE and IWUE were the highest in the treatment of 75%ET_c and N-P₂O₅-K₂O application rate of 180-90-90 kg/hm² but the PFP was the highest in the treatment of 120%ET_c and N-P₂O₅-K₂O application rate of 60-90-90 kg/hm². In 2017, the IWUE were the highest in the treatment of 75%ET_c and N-P₂O₅-K₂O application rate of 300-150-150 kg/hm² but the PFP was the highest in the treatment of 90%ET_c and N-P₂O₅-K₂O application rate of 150-70-70 kg/hm². By multiple regression, the treatments of irrigation and fertilizer application rate were different when the maximal yield, WUE and PFP were obtained. When the irrigation amount was 323-446 mm and the N-P₂O₅-K₂O application rate was between 210-104-104 kg/hm² and 325-163-163 kg/hm², the yield and WUE could reach 95% confidence interval of maximal yield and maximal WUE while the PFP under the this combined treatment was only about 30% of maximal PFP. The results could provide guidance to field irrigation and fertilizer application in the field in Ningxia.

Keywords: irrigation; fertilizers; evapotranspiration; spring maize; yield; water use efficiency; partial factor productivity of fertilizer