

不同水肥管理模式下糯玉米水氮利用及熵权 TOPSIS 综合评价

李若帆¹, 马娟娟¹, 孙西欢^{1,2}, 郭向红¹, 段勇¹, 任青¹

(1. 太原理工大学, 山西 太原 030024; 2. 晋中学院, 山西 晋中 030600)

摘要:为探究施肥与灌水方式对糯玉米各生育期株高、叶面积指数、产量品质及水氮利用率的影响,以晋糯41号为材料进行田间试验,设置 I_0 (播种期 $75\% \theta_f \sim 85\% \theta_f$, 苗期~拔节前期 $65\% \theta_f \sim 75\% \theta_f$, 拔节后期~孕穗期 $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$, 孕穗期~开花期 $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$)、 I_1 (播种期 $75\% \theta_f \sim 85\% \theta_f$, 拔节后期~孕穗期 $75\% \theta_f \sim 85\% \theta_f$)2种灌水方式, F_0 (N、P、K肥全部基施)、 F_1 (N、K肥基施30%+拔节期30%追施+大喇叭口期追施40%, P肥全部基施)和 F_2 (N、K肥基施30%+大喇叭口期追施70%, P肥全部基施)3种施肥方式。结果表明:不同施肥水平 F_1 、 F_2 相比 F_0 可增加株高2.86%~4.29%, 增加叶面积指数6.47%~11.61%, 增加鲜穗产量0.63%~8.42%, 提高水分利用效率6.41%~21.34%, 提高灌溉水利用率1.94%~21.88%, 提高氮肥农学效率10.02%~19.80%。 I_1 水平效果更加显著, I_0 相比 I_1 在 F_0 、 F_1 、 F_2 施肥方式下分别可增加鲜穗产量13.57%、5.54%、8.59%, 增加籽粒产量16.14%、2.77%、6.49%, I_1 水平相比 I_0 水平可减少灌水量29.55%、37.02%、25.20%, 减少土壤耗水量20.82%、22.01%、13.44%, 增加灌溉水利用率11.50%、33.31%、17.57%, 增加水分利用效率4.09%、18.69%、6.51%。研究表明 $F_1 I_0$ 处理为最优水肥管理方案。

关键词:糯玉米; 施肥方式; 灌水方式; 水氮利用; 熵权 TOPSIS 评价

中图分类号:S513; S143.1; S274 **文献标志码:**A

Comprehensive evaluation of water and nitrogen utilization of waxy corn based on entropy weight TOPSIS model under different water and fertilizer treatments

LI Ruofan¹, Ma Juanjuan¹, Sun Xihuan^{1,2}, Guo Xianghong¹, Duan Yong¹, Ren Qing¹

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. Jinzhong University, Jinzhong, Shanxi 030600, China)

Abstract: In order to explore the effects of different fertilization methods, irrigation amount, and irrigation times on plant height, leaf area index, yield and quality, water and nitrogen (N) utilization rate of waxy corn in different growth stages, Jinnuo 41 was used as material for a field experiment, two irrigation methods: I_0 (sowing time: $75\% \theta_f \sim 85\% \theta_f$; seedling stage-prophase of jointing: $65\% \theta_f \sim 75\% \theta_f$; anaphase of jointing-booting stage: $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$; booting stage-flowering stage: $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$); I_1 (sowing time: $75\% \theta_f \sim 85\% \theta_f$; anaphase of jointing-booting stage: $70\% \theta_f \sim 80\% \theta_f$), three fertilization methods: F_0 (N, P, K base application), F_1 (N, K base application 30% + jointing stage 30% topdressing + bellmouth stage topdressing 40%, P base application), and F_2 (N, K base application 30% + bellmouth stage topdressing 70%, P base application) were used. The results showed that compared with F_0 , F_1 , and F_2 increased plant height by 2.86%~4.29%, leaf area index by 6.47%~11.61%, fresh ear yield by 0.63%~8.42%, water use efficiency by 6.41%~21.34%, irrigation water use efficiency by 1.94%~21.88%, and agricultural efficiency of nitrogen fertilizer by 10.02%~19.80%. The effect of I_1 was more significant. Compared with I_1 , I_0 increased fresh ear yield in F_0 , F_1 , and F_2 groups by 13.57%, 5.54%, and 8.59%, and increased grain yield by 16.14%, 2.77%, and 6.49%, respectively. Compared with I_0 , I_1 reduced irrigation amount by 29.55%, 37.02%, and 25.20%, reduced soil water consumption by 20.82%,

22.01%, and 13.44%, and increased the water use efficiency by 11.50%, 33.31%, 17.57%, increase water use efficiency by 4.09%, 18.69%, and 6.51% for F_0 , F_1 , and F_2 groups, respectively. Therefore, F_1I_0 treatment was the best water and fertilizer management scheme in this experiment.

Keywords: waxy corn; fertilization methods; irrigation methods; water and nitrogen utilization; entropy weight TOPSIS evaluation

作物水肥利用效率受到作物种类和品种、气候、土壤、水肥管理技术等多种因素的影响,而这些因素之间又相互关联,共同影响着作物产量和水肥吸收利用,进而驱动着作物水肥生产力的形成^[1-2],其中水肥管理最为重要。研究表明^[3-6],水氮配合可以提高玉米水分利用率 70% 左右,营养生长阶段轻度亏水叶面积和干物质积累量未显著降低,拔节期至成熟期轻度亏水玉米单株生物量降低 1.78%,籽粒产量降低 3.9%,提高水分利用率 13.6%;施氮显著增加玉米产量和水分利用率,缩短开花至吐丝期。相同的施肥总量在不同生育期的分配不同会造成产量的显著差异,一次性施肥容易导致玉米生育前期养分供应过剩、挥发淋溶等,后期出现脱氮现象,尤其是肥料种类及用量等因素直接影响玉米整个生育期养分的供应情况^[7]。

水分是影响我国半干旱地区糯玉米产量的限制因素之一,而全膜双垄沟播可以有效降低棵间蒸发占总耗水的比例 (E/ET),提高作物需水与土壤供水的时空吻合度^[8-11],集 C4 作物高效用水、沟垄微集水、蓄水以及地膜覆盖抑蒸、增温、保墒等多项技术的优势于同一模式,显著提高耕地生产力和水分利用效率^[12-14],在北方旱作区得以大面积推广。目前,针对全膜双垄沟播模式下土壤水盐分布^[15]、土壤温度变化^[16]、玉米根系^[17]、生长^[18]、水分利用率^[19]等方面已有大量研究。在水肥管理模式上,前人研究多集中在不同灌水量及施肥量间耦合作用对糯玉米的生理影响,而对灌溉制度和施肥制度统筹考虑较少;康绍忠^[20]提出,发展高品质农业是提高农业竞争力的必然选择,提出了节水调质高效灌溉的决策方法,而目前研究多基于高产,对品质研究较少,考虑糯玉米品质进行综合评价鲜见报道。因此,本研究在山西省晋中地区进行全膜双垄沟播种植模式下的水肥试验,定量分析不同氮、钾肥施用时期与灌水时期及灌水量耦合下糯玉米生育期内株高、叶面积指数的动态变化,对其产量、品质和水氮利用效率进行分析,并运用熵权 TOPSIS 模型进行综合评价,探索综合效果最优的水肥方案,起到以水促肥、以肥调水、水肥调质、高产高效的作

用,旨在为北方半干旱地区糯玉米农田水肥优化管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2019 年 5—8 月在山西省晋中市榆次区东阳试验示范基地 ($37^{\circ}32'44.28''N$, $112^{\circ}37'26.78''E$) 进行,该基地属于典型的温带大陆性季风气候,试验地年平均气温 $9.3^{\circ}C$,年均降水量 430 mm,年平均蒸发量 1 700 mm,无霜期 154 d。土壤类型为潮土,表层土壤质地为中壤土,pH 值 8.55,土壤全氮 $0.78 g \cdot kg^{-1}$,有机质 $10.35 g \cdot kg^{-1}$,碱解氮 $52 mg \cdot kg^{-1}$,速效磷 $49.12 mg \cdot kg^{-1}$,速效钾 $251.29 mg \cdot kg^{-1}$,田间持水量 23.11% (质量含水量),土壤容重 $1.2 g \cdot cm^{-3}$ 。

1.2 供试材料

糯玉米品种为晋糯 41 号,试验肥料为尿素 ($N 46.4\%$)、过磷酸钙 ($P_2O_5 16\%$)、硫酸钾 ($K_2O 51\%$);试验用地膜由白山市喜丰塑业有限公司生产,膜宽 140 cm。

1.3 试验方案

试验小区种植方式为全膜双垄沟播宽窄行种植(小垄宽 40 cm、垄高 15 cm,大垄宽 70 cm、垄高 10 cm),大小垄相接处形成播种沟,用塑料地膜全地面覆盖,每 2~3 m 横压一条土腰带,点播机破膜点播,种植密度 $60\ 000 株 \cdot hm^{-2}$,2019 年 5 月 19 日播种,8 月 8 日采收,全生育期 82 d。试验设灌水方式和施肥方式两因素,具体见表 1。灌水时间与灌水次数设 2 个水平, I_1 即在播种期、拔节后期—孕穗期分别控制土壤含水率在适宜含水率水平,其余生育期不灌溉,以糯玉米全生育期正常灌水 I_0 作对照。施肥方式设 3 个水平。试验共 6 个处理,分别记为 F_0I_0 、 F_0I_1 、 F_1I_0 、 F_1I_1 、 F_2I_0 、 F_2I_1 。采用随机区组设计,小区为 6 行区,行长 6 m,每处理 4 次重复,另设不施氮肥小区作空白,其他处理和试验小区一致。施肥量根据土壤的基础肥力情况及当地经验水平确定,施氮量为 $180 kg \cdot hm^{-2}$,N、P、K 三要素的比例约为 3 : 1 : 2,各处理的施肥总量相同,其中 P 肥全部

基施,N、K 肥采用基施+追施的方法。灌水量根据土壤含水率监测值与土壤适宜含水率进行计算确定,小区土壤含水率每 7 d 监测 1 次至生育期结束。

2019 年玉米生育期内降雨情况如表 2 所示。

1.4 测试项目及方法

1.4.1 糯玉米生育期内灌水量确定 土壤含水率采用烘干法进行测定,每小区在玉米株间及行间取 3 个土样,每 20 cm 为一层,取样深度为 100 cm,计算土壤含水率(%),并根据试验方案确定补灌量,控制含水率在试验设计范围内,补灌量(m)按照以下公式^[21]进行确定:

$$m = 10\rho_b \times H \times (\beta_i - \beta_j) \quad (1)$$

式中, H 为该时段土壤计划湿润层的深度(苗期 40 cm,拔节至成熟 60 cm), ρ_b 为计划湿润层内土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), β_i 为设计含水量, β_j 为自然含水量,即灌溉前土壤含水量。

1.4.2 糯玉米生长指标测定 每小区选取长势均匀的 5 株玉米,测定其各生育期株高、叶面积并作标记,利用长宽系数法推求叶面积指数^[22]。

1.4.3 糯玉米品质测定 在适宜鲜食期(即以果穗花丝干枯,果穗外苞叶由绿转黄绿,籽粒在乳熟后期至蜡熟初期)取 5 株果穗测定粗蛋白及可溶性

糖,可溶性糖的测定采用蒽酮比色法^[23],粗蛋白的测定采用凯式定氮法^[24]。

1.4.4 测产及室内考种 在糯玉米收获期选择各试验处理小区连续随机 20 株玉米穗作为考种样本,测定其穗长、穗粗、穗行数、行粒数、突尖长、百粒鲜重、百粒干重等产量性状指标,按实收计算产量,并进行耗水量(ET)、水分利用效率(WUE)的计算。

作物耗水量(ET ,mm)计算公式^[25]:

$$ET = P + I + U - D - R - \Delta W \quad (2)$$

其中, P 为生育期降雨量(mm); I 为灌水量(mm); U 为地下水补给量(mm); D 为深层渗漏量(mm); R 为径流量(mm); ΔW 为试验初期和末期土壤水分变化量(mm)。试验地地势平坦,地下水埋藏大于 50 m,试验设计湿润层较浅, U 、 R 、 D 均可忽略不计,故将耗水量计算公式简化如下:

$$ET = P + I - \Delta W \quad (3)$$

表 2 2019 年度糯玉米生育期降雨量/mm

Table 2 Rainfall during the growth period of waxy corn in 2019

苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	拔节期~开花期 Jointing~ flowering	开花期~采收期 Flowering~ recovery	总计 Total
44.0	3.2	27.5	30.5	105.2

表 1 全膜双垄沟播糯玉米灌水施肥处理

Table 1 Irrigation and fertilization treatments of waxy corn planted in double ridge and furrow with full film

灌水 Irrigation treatment	土壤含水率 Moisture content of soil	施肥 Fertilization treatments	施肥方式 Fertilization methods
	播种期 75% θ_f ~85% θ_f Sowing time	F_0	N、K 肥全部基施 N、K base application 100%
I_0	苗期~拔节前期 65% θ_f ~75% θ_f Seedling stage~prophase of jointing	F_1	N、K 肥基施 30%+拔节期追施 30%+ 大喇叭口期追施 40%
	拔节后期~孕穗期 70% θ_f ~80% θ_f Anaphase of jointing~booting stage		N、K fertilizer base application 30% + jointing time 30% topdressing+trumpet mouth application 40%
	孕穗期~开花期 70% θ_f ~80% θ_f Booting stage~flowering stage	F_2	N、K 肥基施 30%+大喇叭口期追施 70%
			N、K fertilizer base application 30% + trumpet mouth application 70%
	播种期 75% θ_f ~85% θ_f Sowing time	F_0	N、K 肥全部基施 N、K base application 100%
I_1	苗期~拔节前期 60% θ_f ~70% θ_f Seedling stage~prophase of jointing	F_1	N、K 肥基施 30%+拔节期追施 30%+ 大喇叭口期追施 40%
	拔节后期~孕穗期 75% θ_f ~85% θ_f Anaphase of jointing~booting stage		N、K fertilizer base application 30% + jointing time 30% topdressing + trumpet mouth application 40%
	孕穗期~开花期 50% θ_f ~65% θ_f Booting stage~flowering stage	F_2	N、K 肥基施 30%+大喇叭口期追施 70%
			N、K fertilizer base application 30% + trumpet mouth application 70%

注: θ_f 为田间持水量。

Note: θ_f is the field capacity.

水分利用效率($WUE, \text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$) 计算公式^[26] 如下:

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

其中, Y 为籽粒产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

灌溉水利用率($IWUE, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$) 计算公式^[27]:

$$IWUE = Y/I$$

1.4.5 植株全氮及氮素利用效率 糯玉米收获期每处理选择生长一致的植株 3 株,将叶、茎(除叶片和籽粒以外的植株地上部分)、籽粒 3 部分分开,通过 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮,采用半自动凯氏定氮仪测定全氮含量。计算公式^[28] 如下:

植株总氮素积累量 = 成熟期单株干重 \times 小区植株密度 \times 成熟期单株含氮量 (5)

各器官的氮分配比例 = 各器官氮吸收量 / 植株总氮吸收量 $\times 100\%$ (6)

氮肥农学效率(NAE) = (施氮区鲜穗产量 - 不施氮区鲜穗产量) / 施氮量 (7)

氮素利用效率(NUE) = 产量 / 植株总氮吸收量 (8)

肥料偏生产力($PFPP$) = 产量 / 施肥量 (9)

1.5 数据处理

利用 Excel 进行数据整理并作图,SPSS 进行统计分析,采用 Duncan 法进行差异性分析。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对糯玉米生长的影响

图 1 为不同水肥处理下糯玉米平均株高、叶面积指数随生育期的变化。由图 1 可知,相同灌水水平下成熟期株高 F_1I_0 、 F_2I_0 相比 F_0I_0 分别提高 4.3%、4.9%, F_1I_1 、 F_2I_1 相比 F_0I_1 分别提高 4.28%、4.83%,不同施肥水平对糯玉米株高除成熟期外差异不显著;相同施肥方式下, F_0I_0 、 F_1I_0 、 F_2I_0 相比 F_0I_1 、 F_1I_1 、 F_2I_1 株高在苗期提高 1.98%、2.50%、-0.99%,拔节期提高 4.81%、4.02%、4.25%,孕穗期提高 4.11%、3.41%、3.67%,成熟期提高 4.63%、5.38%、3.62%。综合来看,分次施肥、增加灌水均可以有效增加拔节至成熟期糯玉米株高,主要体现在拔节期至孕穗期,几种处理对于株高的促进作用 $F_2 > F_1 > F_0, I_0 > I_1$ 。

不同水肥处理下糯玉米成熟期叶面积指数表现为 $F_1I_0 > F_2I_0 > F_0I_0 > F_1I_1 > F_2I_1 > F_0I_1$ 。相同灌水水平下, F_1I_0 、 F_2I_0 相比 F_0I_0 叶面积指数在苗期提高 3.05%、-4.22%,拔节期提高 5.88%、-7.13%,孕穗期提高 3.64%、-5.96%,成熟期提高 0.78%、0.83%; F_1I_1 、 F_2I_1 相比 F_0I_1 叶面积指数在苗期提高 4.54%、5.26%,拔节期提高 19.47%、8.33%,孕穗期提高 17.66%、

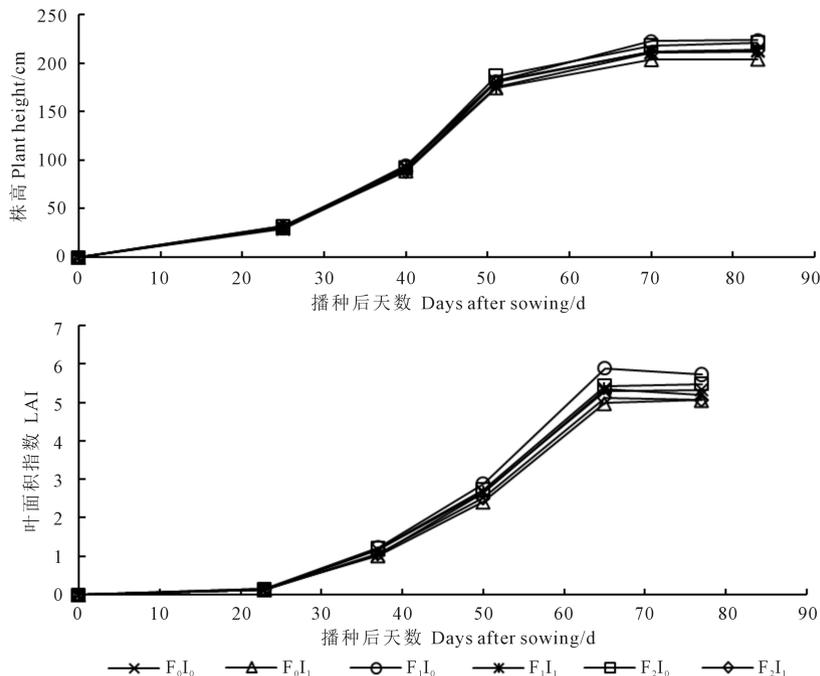


图 1 不同水肥处理下糯玉米株高、叶面积指数随生育期变化曲线

Fig.1 Changes of plant height and leaf area index of waxy corn with growth period under different water and fertilizer treatments

7.79%,成熟期提高 4.76%、4.50%。相同施肥方式下, F_0I_0 、 F_1I_0 、 F_2I_0 相比 F_0I_1 、 F_1I_1 、 F_2I_1 叶面积指数在苗期提高-3.09%、-4.47%、-11.81%,拔节期提高 32.86%、17.76%、13.90%,孕穗期提高 34.49%、18.47%、17.34%,成熟期提高 5.74%、1.72%、2.02%。从试验结果来看,除 F_2I_0 外,分次施肥、增加灌水均可以有效增加拔节至成熟期糯玉米叶面积指数,分次施肥对于糯玉米叶面积指数的促进作用在减少灌水时更加显著,这与各生育期土壤水肥耦合作用有关。

不同处理糯玉米株高、叶面积指数随时间呈现缓慢增长-快速增长-缓慢增长的趋势,即呈“S”型增长,可以用 Logistic 方程拟合^[29]: $Y = \frac{a}{1+be^{-kt}}$,该方程为作物生物量积累速率方程,通过求导可得出生物量积累的最大速率(v_{max})及最大速率的时间节点(t_2);对通式求二阶导并令其为零,即可得到生长曲线上 2 个突变拐点 t_1 、 t_3 ,从而确定生物量的渐增期、快增期和缓增期;在快增期作物积累量增长迅速,由 t_1 、 t_3 求出快增期作物生物量积累的平均增长速度(v)。各特征值计算如下,得出其参数及相关拐点值如表 3 所示。

$$v_{max} = \frac{ak}{4} \quad (10)$$

$$t_1 = \frac{\ln b - \ln(2 + \sqrt{3})}{k} \quad (11)$$

$$t_2 = \frac{\ln b}{k} \quad (12)$$

$$t_3 = \frac{\ln b - \ln(2 - \sqrt{3})}{k} \quad (13)$$

$$v = \frac{K}{\sqrt{3}(t_3 - t_1)} \quad (14)$$

式中, a 为一定环境条件下玉米单株生长量的上限, K 为环境最大生物积累量容纳值, b 、 k 为待定系数。

分析可知 F_0I_0 、 F_0I_1 、 F_1I_0 、 F_1I_1 、 F_2I_0 、 F_2I_1 株高渐增期分别为 0~31.4、0~31.4、0~31.7、0~31.6、0~31.9、0~31.7 d。不同施肥方式及苗期~拔节前期灌水对糯玉米株高作用不明显, F_0I_0 、 F_0I_1 、 F_1I_0 、 F_1I_1 、 F_2I_0 、 F_2I_1 株高快增期分别为 31.4~50.4、31.4~50.4、31.7~51.6、31.6~51.1、31.9~50.6、31.7~50.8 d,快增期平均速度分别为 6.567、6.281、6.574、6.359、6.890、6.531 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。相同施肥水平下不同灌水水平间相差 3.38%~5.50%,相同灌水水平下不同施肥水平间 F_0I_0 、 F_2I_0 相比 F_1I_0 可缩短生育进程 1~1.2 d, F_0I_1 、 F_2I_1 相比 F_1I_1 可缩短生育进程 0.3~0.7 d。

F_0I_0 、 F_0I_1 、 F_1I_0 、 F_1I_1 、 F_2I_0 、 F_2I_1 叶面积指数渐增期分别为 0~41.8、0~45.2、0~41.3、0~43.4、0~42.9、0~44.6 d。分析可知相同施肥水平下 I_0 水平相比 I_1 水平可以缩短糯玉米生育进程 1.7~3.4 d,相同灌水水平下不同施肥水平叶面积指数 F_1 渐增期最短,生育进程最快, F_0I_0 、 F_0I_1 、 F_1I_0 、 F_1I_1 、 F_2I_0 、 F_2I_1 叶面积指数快增期分别为 41.8~62.5、45.2~64.1、41.3~62.3、43.4~63.9、42.9~63.1、44.6~64.3 d,快增期平均速度分别为 0.156、0.161、0.154、0.156、0.160、0.161 d^{-1} 。相同施肥模式下 I_0 处理相比 I_1 处理可以缩短糯玉米生育进程 0.6~1.6 d,相同灌水条件下不同施肥方式间生育进程相差不大,快增期平均速度几组处理间差异不明显。

2.2 不同水肥处理对糯玉米产量及品质的影响

表 4 为不同水肥处理对糯玉米产量及品质的影响,不同水肥处理下糯玉米穗粒数、秃尖无显著差异。相同灌水水平下, I_0 组 F_1 、 F_2 相比 F_0 增加穗长 5.08%、5.92%,增加穗粗 11.41%、5.83%,增加鲜穗产量 0.78%、0.63%,增加可溶性糖 47.37%、36.95%,其

表 3 不同水肥处理糯玉米株高、叶面积变化的生长动态方程参数及相关拐点
Table 3 Growth dynamic equation parameters and correlation points of plant height and leaf area of waxy corn under different water and fertilizer treatments

项目 Item	处理 Treatment	a	b	k	R^2	t_1	t_2	t_3	v_{max}	v
株高 Plant height	F_0I_0	215.676	292.701	0.139	0.991	31.401	40.881	50.362	7.490	6.567
	F_0I_1	206.606	289.313	0.139	0.990	31.365	40.861	50.356	7.164	6.281
	F_1I_0	226.640	247.452	0.132	0.995	31.695	41.647	51.599	7.498	6.574
	F_1I_1	215.001	264.619	0.135	0.994	31.582	41.343	51.104	7.252	6.359
	F_2I_0	223.401	333.246	0.141	0.989	31.925	41.285	50.645	7.858	6.890
	F_2I_1	215.980	298.011	0.138	0.988	31.749	41.295	50.841	7.449	6.531
叶面积指数 LAI	F_0I_0	5.562	783.382	0.128	0.992	41.844	52.152	62.459	0.178	0.156
	F_0I_1	5.265	2019.394	0.139	0.990	45.157	54.607	64.056	0.183	0.161
	F_1I_0	5.602	650.660	0.125	0.992	41.258	51.786	62.315	0.175	0.154
	F_1I_1	5.525	990.330	0.129	0.991	43.389	53.628	63.867	0.178	0.156
	F_2I_0	5.606	988.769	0.130	0.992	42.883	53.006	63.128	0.182	0.160
	F_2I_1	5.502	1443.758	0.134	0.991	44.606	54.466	64.326	0.184	0.161

中穗长、可溶性糖达显著性差异,鲜穗产量、粗蛋白无显著性差异; I_1 组 F_1 相比 F_0 、 F_2 可显著增加百粒干重、鲜穗产量、粗蛋白, F_0I_1 显著增加可溶性糖;相同施肥方式下 F_0I_0 相比 F_0I_1 增加百粒干重 10%,增加鲜穗产量 13.57%, F_1I_0 相比 F_1I_1 增加百粒干重 2.90%,增加鲜穗产量 5.54%, F_2I_0 相比 F_2I_1 增加百粒干重 2.96%,增加鲜穗产量 8.59%,三组鲜穗产量组间差异显著,且灌水对一次性基施的作用更大。综合来看,灌水与施肥方式共同影响糯玉米的可溶性糖含量,不同水肥处理成熟期籽粒粗蛋白含量 F_0I_1 显著低于其余处理($P<0.05$),除 F_0 组外,相同施肥方式不同灌水组合对糯玉米籽粒粗蛋白作用组内差异不显著,说明氮、钾肥分次施肥由于各生育期根区土壤水肥耦合作用灌水对粗蛋白影响较小,而全部基施增加灌水可增加糯玉米籽粒粗蛋白含量。

2.3 不同水肥处理对糯玉米耗水量及水分利用效率的影响

从表 5 可以看出, I_1 相比 I_0 可显著减少灌溉水量,相同灌水水平下氮、钾肥分次施入可显著减少土壤储水量变化,有利于涵养土壤水源,就耗水量而言,氮、钾肥分次施入可显著减少糯玉米耗水量,

氮钾肥追施一次耗水量最低,并在 I_0 水平下差异显著, I_1 水平下 F_0 显著高于 F_1 、 F_2 , F_1 、 F_2 间差异不显著,水分利用效率、灌溉水利用率变化规律均为 $F_1I_1 > F_2I_1 > F_2I_0 > F_1I_0 > F_0I_1 > F_0I_0$,由此可见氮、钾肥分次施入可以显著增加作物对土壤水分的吸收效率,尤其 I_1 水平可显著减少灌溉水量、耗水量,提高水分利用效率及灌溉水利用率。

对鲜穗产量与各时期叶面积和株高进行相关分析,得出相关系数见表 6,糯玉米鲜穗产量与拔节中后期至收获期叶面积指数显著正相关,鲜穗产量与拔节中后至开花期株高显著正相关,由此可见拔节中后期至成熟期糯玉米对根区土壤水肥需求较敏感,保证该时期土壤水肥供应有利于提高叶面积指数,提高鲜穗产量。

2.4 不同水肥处理对糯玉米氮素积累及氮素利用率的影响

表 7 为不同水肥处理下糯玉米氮素积累及利用情况,相同灌水水平下 I_0 组 F_0 、 F_1 成熟期氮积累总量显著高于 F_2 ,而相同灌水水平籽粒氮素分配率不同施肥方式间差异不显著,由此可见苗期、拔节期较高的氮素水平可以显著提高成熟期植株氮积累总

表 4 不同水肥处理糯玉米产量及品质

Table 4 Yield and quality of waxy corn treated with different water and fertilizer

处理 Treatment	穗长/cm Ear length	穗粗/cm Ear diameter	穗粒数 Ear number	秃尖/cm Tip length	百粒干重/g 100-grain dry weight	鲜穗产量/(kg·hm ⁻²) Fresh spike yield	粗蛋白/% Crude protein	可溶性糖/% Soluble sugar
F_0I_0	17.73b	4.12b	511.28a	2.12a	10.45a	11753.37ab	10.33a	1.632c
F_0I_1	17.80b	4.13b	511.82a	3.49a	9.50d	10348.37d	9.45b	2.705a
F_1I_0	18.63a	4.59a	551.81a	2.46a	10.66a	11844.56a	10.28a	2.405a
F_1I_1	17.52bc	4.39ab	509.79a	2.66a	10.36ab	11223.12bc	10.19a	1.967bc
F_2I_0	18.78a	4.36ab	517.03a	2.27a	10.09bc	11827.68a	10.01a	2.235ab
F_2I_1	17.10c	4.18b	500.04a	2.38a	9.8cd	10892.14cd	9.83ab	1.729c

注: 同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different letters in the same row indicate significant difference among treatments($P<0.05$), the same below.

表 5 不同水肥处理糯玉米耗水量及水分利用率

Table 5 Water consumption and water use efficiency of waxy corn treated with different water and fertilizer

处理 Treatment	灌溉量	播前土壤储水量		收获后土壤储水量		土壤储水量变化 Soil water storage change/mm	耗水量 Water consumption /mm	WUE /(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)	IWUE /(kg·mm ⁻¹ ·hm ⁻²)
	Irrigation amount /mm	Soil water storage before sowing/mm	Soil water storage after harvest/mm	Soil water storage after harvest/mm	Soil water storage change/mm				
F_0I_0	232.939a	209.76	163.10	46.66a	384.80a	9.05c	14.96e		
F_0I_1	179.813c	198.80	165.32	33.48b	318.49b	9.42bc	16.68c		
F_1I_0	236.32a	192.31	159.53	32.78bc	374.30a	9.63b	15.25d		
F_1I_1	172.469c	199.44	170.33	29.11c	306.78c	11.43a	20.33a		
F_2I_0	206.08b	195.69	169.32	26.37c	337.65b	9.83b	16.11c		
F_2I_1	164.606c	193.11	165.27	27.84c	297.65c	10.47ab	18.94b		

表 6 糯玉米产量与叶面积、株高相关系数

Table 6 Correlation coefficient of waxy corn yield with leaf area and plant height

项目 Item	叶面积指数 LAI					株高 Plant height/cm				
	25d	40d	51d	70d	82d	25d	40d	51d	70d	82d
鲜穗产量 Fresh ear yield	-0.544	0.928**	0.955**	0.993**	0.938**	-0.134	0.922**	0.887*	0.831*	0.769

注 Note: * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

量,主要增加叶片氮素,生育中后期施氮肥有利于氮素向籽粒转运。生育期氮、钾肥分次施入可显著提高氮肥农学效率、氮肥偏生产力,不同施肥方式氮素吸收效率差异不显著,增加灌水可显著提高糯玉米氮肥农学效率、氮肥偏生产力、氮素吸收效率,说明了水分可以促进氮素的积累吸收,水分亏缺限制氮素的吸收利用。

2.5 基于熵权 TOPSIS 模型评价水肥管理方案

构建糯玉米水肥管理方案综合评价指标体系如表 8 所示,通过构建评价指标值的加权标准化决策矩阵来确定决策的理想解和负理想解,然后计算被评价方案与理想解和负理想解之间的欧氏距离,从而确定被评价方案与理想方案的相对贴近程度,最后选择最贴近理想解的方案作为最优决策^[30]。

建模和求解步骤如下:

(1) 设参与多目标决策的方案集为 $M = (M_1, M_2, \dots, M_n)$, 指标集为 $D = (D_1, D_2, \dots, D_m)$, 方案 M_i 对指标 D_j 的值为 y_{ij} , 则形成决策矩阵 $Y = (y_{ij})_{n \times m}$ 。

(2) 将决策矩阵进行标准化处理,得到标准化决策矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。

$$R = \begin{bmatrix} 0.939 & 0 & 0.613 & 1 & 0 \\ 0 & 0.155 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0.244 & 1 & 0.943 & 0.720 \\ 0.585 & 1 & 0.415 & 0.841 & 0.312 \\ 0.989 & 0.328 & 0.959 & 0.636 & 0.562 \\ 0.363 & 0.597 & 0.210 & 0.432 & 0.090 \end{bmatrix}$$

其中对于越大越优的收益型指标 $r_{ij} =$

$$\frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}}, \text{对于越小越优的成本型指标 } r_{ij} =$$

$$\frac{\max y_{ij} - y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}}, \text{本文指标按照越大越优的收益型指标进行标准化。}$$

(3) 熵权计算:对于 n 个评价样本, m 个评价指标,其第 j 个指标的熵定义为:

$$H_j = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

式中, $f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}}$, $k = \frac{1}{\ln n}$, 且假定当 $f_{ij} = 0$ 时,

$$f_{ij} \ln f_{ij} = 0。$$

表 7 不同水肥处理糯玉米氮素积累及氮素利用

Table 7 Nitrogen accumulation and utilization of waxy corn under different water and fertilizer treatments

处理 Treatment	氮积累总量 Nitrogen accumulation (kg · hm ⁻²)	氮素分配率/% Nitrogen distribution rate			氮肥农学效率 NAE/(kg · kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 PFP/(kg · kg ⁻¹)	氮素吸收效率 NUE/(kg · kg ⁻¹)
		叶 Leaf	茎 Stem	籽粒 Grain			
F ₀ I ₀	122.45a	26.77ab	34.62c	38.60ab	10.57b	65.30ab	0.68a
F ₀ I ₁	103.16c	27.62a	35.37c	37.01c	8.18d	57.49c	0.57b
F ₁ I ₀	123.43a	22.93bc	37.63a	39.44a	12.08a	65.80a	0.69a
F ₁ I ₁	106.43c	25.47b	36.31b	38.23b	9.8c	62.35b	0.59b
F ₂ I ₀	114.72b	23.37c	37.72a	38.90ab	11.92a	65.71a	0.64a
F ₂ I ₁	104.94c	25.35b	36.8ab	37.82bc	9.0cd	60.51b	0.58b

表 8 评价指标体系

Table 8 Evaluation index system

目标层 Target layer	准则层 Criterion level	指标层 Index level	指标说明 Index description
糯玉米水肥管理 方案优选(A) Optimization of water and fertilizer management plan for waxy corn	高产(B1) High yield	鲜穗产量(C1) Fresh ear yield	各处理的鲜穗产量 Fresh ear yield in different treatments
		水分利用效率(C2) WUE	各处理单位耗水量所生产的籽粒产量 Grain yield per unit water consumption in different treatments
	高效(B2) High efficiency	氮肥农学效率(C3) NAE	各处理单位施氮量所生产的鲜穗产量 Fresh yield produced by unit nitrogen application in different treatments
		粗蛋白(C4) Crude protein	各处理籽粒粗蛋白含量 Crude protein content of seeds in different treatments
	优质(B3) High quality	可溶性糖(C5) Soluble sugar	各处理籽粒可溶性糖含量 Soluble sugar content of seeds in different treatments

第 j 个指标的熵权为:

$$w_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (16)$$

本文评价模型各指标熵权计算得 $w_j = (0.1581, 0.2512, 0.1993, 0.1446, 0.2467)$ 。

(4) 将标准化决策矩阵与各指标的权重相乘, 得到加权的标准化决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times m}$ 。

$$Z = \begin{bmatrix} 0.148 & 0 & 0.122 & 0.145 & 0 \\ 0 & 0.039 & 0 & 0 & 0.247 \\ 0.158 & 0.061 & 0.199 & 0.136 & 0.178 \\ 0.092 & 0.251 & 0.083 & 0.122 & 0.077 \\ 0.156 & 0.082 & 0.191 & 0.092 & 0.139 \\ 0.057 & 0.150 & 0.042 & 0.062 & 0.022 \end{bmatrix}$$

(5) 确定正理想解 x^+ 和负理想解 x^- , 对于越大越优的收益型指标, $x_j^+ = \max Z_{ij}, x_j^- = \min Z_{ij}$, 计算方案正负理想解如下:

$$x^+ = (0.156, 0.251, 0.199, 0.145, 0.247)$$

$$x^- = (0, 0, 0, 0, 0)$$

(6) 计算各个方案分别与正理想解和负理想解的欧式距离:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - x_j^+)^2} \quad (17)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - x_j^-)^2} \quad (18)$$

解得

$$d^+ = (0.361, 0.361, 0.202, 0.217, 0.207, 0.320)$$

$$d^- = (0.241, 0.250, 0.344, 0.315, 0.309, 0.179)$$

(7) 计算各方案与最优方案相对贴近度 S_i :

$$S_i = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} \quad (19)$$

S_i 取值范围为 0 到 1, S_i 最大者为优, 各方案 S_i 见图 2, 不同水肥处理方案贴近度 S_i 从优到劣依次为 F_1I_0 、 F_2I_0 、 F_1I_1 、 F_0I_1 、 F_0I_0 、 F_2I_1 。在 6 个水肥管理方案中 F_1I_0 贴近度 S_i 为 63.0%, 贴近度最大, 而 F_1I_0 、 F_1I_1 、 F_2I_0 方案贴近度 S_i 均介于 59.18% ~ 63.0%, 贴近度较为接近, 说明这 3 种水肥管理方案综合效果

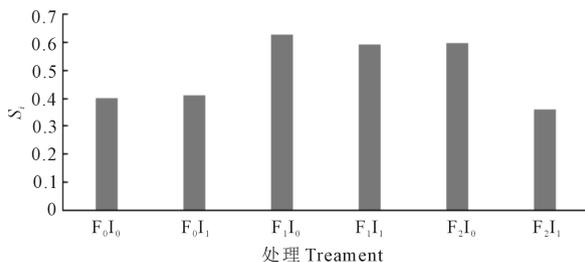


图 2 各处理贴合度 (S_i)

Fig.2 Each processing fit (S_i)

相差不大, 而 F_1I_1 相比 F_1I_0 减少灌溉水量 $638 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 鲜穗产量减少 5.54%, 籽粒产量减少 2.77%, 水分利用效率及灌溉水利用率最高, 综合分析可得 F_1I_0 方案高产高效优质综合效果最优, F_1I_0 (即播种期 (75% ~ 85%) θ_f 、苗期 ~ 拔节前期 (65% ~ 75%) θ_f 、拔节后期 ~ 孕穗期 (70% ~ 80%) θ_f 、孕穗期 ~ 开花期 (70% ~ 80%) θ_f 、N、K 肥基施 30% + 拔节期 30% 追施 + 大喇叭口期追施 40%) 为本次糯玉米试验的最优水肥管理方案, 而在灌溉水源不充足, 灌溉条件受限制的地区则可使用 F_1I_1 (即播种期 (75% ~ 85%) θ_f 、拔节后期 ~ 孕穗期 (75% ~ 85%) θ_f 、N、K 肥基施 30% + 拔节期 30% 追施 + 大喇叭口期追施 40%)。

3 讨论

在施氮条件下结合灌水可充分发挥出水氮之间的耦合效应, 可提高氮肥利用率^[31], 且增产效果显著^[32-33], 分次追施氮肥或氮肥后移相对于传统一次性全施基肥可增加拔节后玉米叶绿素含量、光合特性^[34], 提高籽粒的灌浆速率^[35], 减少氮素的田间表观损失, 显著提高氮肥利用率, 最终提高粒重和产量^[36]。

赵凡^[37]对全膜双垄沟播下玉米生长势进行 Richards 生长方程拟合表明玉米株高及单株叶面积均呈“慢-快-慢”的 S 型 Richards 模型曲线变化, 且左尾短、右尾长, 与本研究结论相似, 而不同水肥管理模式对不同生长势最大生长速率及出现时间有一定影响, 增加灌水可增加糯玉米株高快增期平均速度 3.38% ~ 5.50%, 而对叶面积指数影响不大, 不同施肥方式对糯玉米生长势作用规律不明显。

方彦杰等^[38]研究得出全膜双垄沟播种植模式下, 玉米水分临界期集雨补灌可增加 0 ~ 200 cm 土壤平均贮水量, 提高玉米产量及 WUE; 本研究中糯玉米苗期 ~ 拔节前期、拔节后期 ~ 孕穗期、孕穗期 ~ 开花期进行补灌可以增加产量, 而拔节后期 ~ 孕穗期补灌一次显著减少耗水量, 提高糯玉米水分利用效率及灌溉水利用率。

田建柯等^[39]研究表明不同灌水量对玉米株高、叶面积和干物质质量表现出相同的变化规律, 均随着灌水量的增大而增大, 本研究中, I_0 组株高、叶面积均高于 I_1 组, 与其研究结果一致; 王勇等^[40]和 Shirazi 等^[41]研究表明随着灌水量增加玉米产量及其构成要素具有不同程度的增加趋势, 但当灌溉定额超过一定值之后, 产量并无显著提高甚至有下降的趋势; 有学者研究认为, 玉米的灌水量和产量的关系呈抛物线变化趋势^[42-43]。本研究中 I_0 相比 I_1 可增加穗长、穗粗、鲜穗产量及可溶性糖含量, 试验

方案设计为非充分灌溉并未达到灌溉水量的阈值,故本试验中产量及其构成随灌水量增加有不同程度的增加。张国强^[44]研究表明将灌溉量适当降低10%或20%时,产量无明显降低趋势,并且具有较高的水分利用效率,可以节约灌水 540~1 680 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,与本研究结果一致。本研究表明灌水量也受施肥方式的影响, F_2 施肥水平下灌水量、耗水量最小,在 F_1 施肥水平下, F_1I_1 相比 F_1I_0 减少灌溉水量 638 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,鲜穗产量减少 5.54%,籽粒产量减少 2.77%,水分利用效率及灌溉水利用率最高。

郭丙玉^[45]研究表明从抽雄吐丝期至籽粒形成期是滴灌玉米干物质积累与氮素吸收最快时期;苟志文等^[46]研究表明在总施氮量为 450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的水平下,玉米拔节期追施 45 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、大喇叭口期追施 180 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、花后 10 d 追施 135 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥,可有效提高地膜覆盖玉米的氮素供需吻合度,增加玉米生育后期氮素积累量,提高产量、氮素收获指数和氮肥利用率,这与本研究得出的最优方案氮、钾肥生育期追施方案一致。

4 结 论

1) 分次施肥、增加灌水均可以有效增加拔节至成熟期糯玉米株高及叶面积指数,最大速率均发生在拔节期,集中在拔节中后期,并在一定程度上缩短糯玉米生育进程,对于成熟期株高促进作用 $F_2 > F_1 > F_0$, $I_0 > I_1$, F_1 、 F_2 相比 F_0 增加 4.29%、2.86%,叶面积指数的促进作用 $F_1 > F_2 > F_0$, $I_0 > I_1$, I_1 水平促进作用更显著, F_1 、 F_2 相比 F_0 平均增加 11.61%、6.47%,这与气候因素、拔节至孕穗期水肥耦合作用有关。

2) I_0 水平 F_1 、 F_2 相比 F_0 增加鲜穗产量 0.78%、0.63%,提高水分利用效率 6.41%、8.42%,提高灌溉水利用率 1.94%、7.69%,提高氮肥农学效率 14.29%、12.77%; I_1 组 F_1 、 F_2 相比 F_0 增加鲜穗产量 8.45%、5.25%,提高水分利用效率 21.34%、11.15%,提高灌溉水利用率 21.88%、13.55%,提高氮肥农学效率 19.80%、10.02%, F_1 、 F_2 施肥方式优于 F_0 。

3) 不同施肥水平 F_0 、 F_1 、 F_2 在 I_0 水平相比 I_1 水平可增加鲜穗产量 13.57%、5.54%、8.59%, I_1 水平相比 I_0 水平可减少灌水量 29.55%、37.02%、25.20%,减少土壤耗水量 20.82%、22.01%、13.44%,增加灌溉水利用率 11.50%、33.31%、17.57%,增加水分利用效率 4.09%、18.69%、6.51%。 F_1 施肥水平产量对水分亏缺有较好的适应性, I_0 水平有利于增产,而 I_1 利用率更高。

4) 不同水肥管理方案的熵权 TOPSIS 模型评价

F_1I_0 (即播种期(75%~85%) θ_f 、苗期~拔节前期(65%~75%) θ_f 、拔节后期~孕穗期(70%~80%) θ_f 、孕穗期~开花期(70%~80%) θ_f 、N、K肥基施30%+拔节期30%追施+大喇叭口期追施40%)贴进度最高,为本次试验最优水肥管理方案,灌溉水源不充足,灌溉条件受限制的地区则可使用 F_1I_1 (即播种期(75%~85%) θ_f 、拔节后期~孕穗期(75%~85%) θ_f 、N、K肥基施30%+拔节期30%追施+大喇叭口期追施40%)替代。

参 考 文 献:

- [1] 王介勇,刘彦随. 1990年至2005年中国粮食产量重也演进格局及其驱动机制[J]. 资源科学, 2009, 31(7): 1188-1194.
- [2] 韩荣青,戴尔阜,吴绍洪. 中国粮食生产力研究的若干问题与展望[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1175-1183.
- [3] 詹其厚,陈杰. 水肥配合对玉米产量及其利用效率的影响[J]. 土壤肥料, 2005, (4): 14-18.
- [4] 周英捷,傅丰贝,李伏生. 水肥调控下糯玉米生长、产量和水分利用效率研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 114-118.
- [5] 陈倩倩,范阳阳,郝影宾,等. 不同土壤水分含量对玉米气孔发育过程和蒸腾耗水量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 76-79, 95.
- [6] 寇明蕾,王密侠,周富彦,等. 水分胁迫对夏玉米耗水规律及生长发育的影响[J]. 节水灌溉, 2008, (11): 18-21.
- [7] 王寅,冯国忠,张天山,等. 控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 518-528.
- [8] Ramakrishna A, Tam H M, Wania S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam[J]. Field Crops Research, 2006, 95(2-3): 115-125.
- [9] Wang X L, Li F M, Jia Y, et al. Increasing potato yields with additional water and increased soil temperature [J]. Agricultural. Water Management, 2005, 78(3): 181-194.
- [10] 王红丽,张绪成,宋尚有,等. 旱地全膜双垄沟播玉米的土壤水热效应及其对产量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2609-2614.
- [11] 吴荣美,王永鹏,李凤民,等. 秸秆还田与全膜双垄集雨沟播耦合对半干旱黄土高原玉米产量和土壤有机碳库的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2855-2862.
- [12] Zhou L M, Li F M, Jin S L. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affects soil water temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41-47.
- [13] 张雷,牛芬菊,李小燕,等. 旱地全膜双垄沟播秋覆膜对玉米产量和水分利用率的影响. 中国农学通报, 2010, 26(22): 142-145.
- [14] Zhang Z C, Zhang S F, Yang J C. Yield, grain quality and water use efficiency of rice under non-flooded mulching cultivation [J]. Field Crops Research, 2008, 108(1): 71-81.
- [15] 金辉,郭军玲,王永亮,等. 全膜双垄沟种植模式对晋北盐碱土水盐动态特征的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (3): 111-117.
- [16] 高宇,任永峰,尹秀兰,等. 旱作作物垄膜种植增温作用及增产效应研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 589-596.
- [17] 高玉红,郭丽琢,牛俊义,等. 栽培方式对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(2): 210-216.
- [18] 孔维萍,成自勇,张芮,等. 不同覆盖及耕作方式对玉米生长和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4): 103-106.
- [19] 方彦杰,黄高宝,李玲玲,等. 旱地全膜双垄沟播玉米生长发育动态及产量形成规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4):

- 128-134.
- [20] 康绍忠. 农业水土工程学科路在何方[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 1-8.
- [21] 吴复学, 孙慧敏, 李海彦, 等. 测墒补灌对小麦水分利用特性和籽粒产量的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(10): 23-26.
- [22] 王健, 蔡焕杰, 陈凤, 等. 夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J]. 水利学报, 2004, (11): 108-113.
- [23] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [24] 王耀忠. 粮油品质分析与检验[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1992: 367-379.
- [25] 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.
- [26] 戚迎龙, 史海滨, 李瑞平, 等. 滴灌水肥一体化条件下覆膜对玉米生长及土壤水肥热的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 99-110.
- [27] 张乐, 君娟, 王怀博, 等. 不同灌水处理对玉米生长特征及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 24-29.
- [28] 高磊, 李余良, 李武, 等. 不同施氮水平对南方甜玉米氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1215-1224.
- [29] 乔嘉, 朱金城, 赵皎. 基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 32-38.
- [30] 缪子梅, 李竞春, 陈栋. 基于熵权 TOPSIS 模型评价渍涝条件下冬小麦水位管理方案[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(12): 1306-1311.
- [31] 王宜伦, 刘天学, 赵鹏, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2483-2491.
- [32] 夏来坤, 刘京宝, 黄璐, 等. 不同施肥模式对夏玉米产量及生长的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(33): 16-19.
- [33] 吕丽华, 董志强, 张经廷, 等. 水氮对冬小麦-夏玉米产量及氮利用效应研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3839-3849.
- [34] 高素玲, 刘松涛, 杨青华, 等. 氮肥减量后移对玉米冠层生理特性和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(24): 114-118.
- [35] 王云奇, 陶洪斌, 王璞, 等. 施氮模式对夏玉米产量和籽粒灌浆的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1594-1598.
- [36] 邹晓锦, 张鑫, 安景文. 氮肥减量后移对玉米产量和氮素吸收利用及农田氮素平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (6): 25-29.
- [37] 赵凡. 基于 Richards 模型的全膜双垄沟播与传统栽培模式玉米生长势差异研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 211-217.
- [38] 方彦杰, 秦安振, 雍蓓蓓. 种植模式和补灌对玉米生长发育及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2019, (6): 30-34, 42.
- [39] 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.
- [40] 王勇, 白玲晓, 赵举, 等. 喷灌条件下玉米地土壤水分动态与水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2012, 28(S1): 92-97.
- [41] Shirazi S M, Yusop Z, Zardari N H, et al. Effect of irrigation regimes and nitrogen levels on the growth and yield of wheat[J]. *Advances in agriculture*, 2014, 2014: 1-6.
- [42] 孙景生, 肖俊夫, 张奇阳, 等. 夏玉米产量与水分关系及其高效用水灌溉制度[J]. 灌溉排水, 1998, 17(3): 19-23.
- [43] 肖俊夫, 刘战东, 刘祖贵, 等. 不同时期干旱和干旱程度对夏玉米生长发育及耗水特性的影响[J]. 玉米科学, 2011, 20(4): 54-58, 64.
- [44] 张国强. 滴灌条件下新疆高产($\geq 15000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)春玉米需水规律及其产量效应研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.
- [45] 郭丙玉. 水氮交互对滴灌玉米水分、养分利用及产量影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2015.
- [46] 苟志文, 胡发龙, 赵财, 等. 氮肥后移满足绿洲灌区全膜覆盖玉米的氮素需求[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 888-895.

(上接第 66 页)

- [17] 武阳, 赵智, 王伟, 等. 调亏灌溉和灌溉方式对香梨树吸收根系重分布的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 244-250, 257.
- [18] 张效星, 樊毅, 贾悦, 等. 水分亏缺对滴灌柑橘光合和产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 143-150.
- [19] 钟韵, 费良军, 曾健, 等. 根域水分亏缺对涌泉灌苹果幼树产量品质和节水的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 78-87.
- [20] DU T S, Kang S Z, Li F S, et al. Water use efficiency is improved by alternate partial root-zone irrigation of apple in arid northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 184-192.
- [21] Consoli S, Stagno F, Vanella D, et al. Partial root-zone drying irrigation in orange orchards: Effects on water use and crop production characteristics[J]. *European Journal Agronomy*, 2017, 82: 190-202.
- [22] Li Z J, Fei L J, Hao K, et al. Effects of arrangement of surge-root irrigation emitters on growth, yield and water use efficiency of apple trees[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020, 38(7): 713-719.
- [23] 杜少卿. 西北旱区分根交替灌溉苹果树水分利用及蒸发蒸腾量估算研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [24] 孙文泰, 马明, 董铁, 等. 陇东旱塬苹果根系分布规律及生理特性对地表覆盖的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3153-3163.
- [25] Sokalska D I, Haman D Z, Szewczuk A, et al. Spatial root distribution of mature apple trees under drip irrigation system[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(6): 917-924.
- [26] 于坤, 郁松林, 刘怀锋, 等. 不同根区交替滴灌方式对赤霞珠葡萄幼苗根冠生长的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 113-120.
- [27] 宋小林, 吴普特, 赵西宁, 等. 黄土高原肥水坑施技术下苹果树根系及土壤水分分布[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 121-128.
- [28] 周青云, 王仰仁, 孙书洪. 根系分区交替滴灌条件下葡萄根系分布特征及生长动态[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 59-63, 58.
- [29] 贾如浩, 杨建利, 赵西宁, 等. 二元覆盖对苹果树低耗水生育期土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4082-4090.
- [30] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3127-3136.
- [31] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 根系分区交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2061-2068.
- [32] 徐巧, 王延平, 韩明玉, 等. 水分调控对干旱山地苹果树生长发育和结实的影响[J]. 节水灌溉, 2016, (2): 9-13.
- [33] 宋凯, 魏钦平, 岳玉苓, 等. 不同修剪方式对‘红富士’苹果密植园树冠光分布特征与产量品质的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1224-1230.
- [34] 殷飞, 黄金林, 胡宇祥. 葡萄大棚滴灌耗水规律研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 233-236.
- [35] 李泽霞, 成自勇, 张芮, 等. 不同灌水上限对酿酒葡萄生长、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(6): 83-85.
- [36] 唐龙, 曹红霞, 李宏礼, 等. 不同氮肥追施量下滴灌水量对苹果产量和品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 10-18.
- [37] 苏里坦, 虎胆·吐马尔白, 张展羽. 分根交替膜下滴灌条件下南疆棉花耗水特性与生长特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 20-25.