

不同灌水和施氮水平对河西春玉米水氮 利用效率和经济效益的影响

闵迪,王增红,李援农,张舵

(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)

摘要:通过田间试验,研究了不同灌溉水平(95% θ_f (土壤田间持水量)、80% θ_f 和 65% θ_f ,依次记为 FI、DI1 和 DI2)和施氮量(0、70、140 kg·hm⁻²和 210 kg·hm⁻²,依次记为 N0、N70、N140 和 N210)对春玉米的产量、水氮利用效率和经济效益等的影响。结果表明:灌水和施氮均可使春玉米产量增加,在 FI 和 DI2 灌溉条件下,春玉米产量随施氮量的增加而显著增加,N210 处理的籽粒产量比 N0 处理分别高 21.8%和 18.8%;但在 DI1 灌溉条件下,N140 和 N210 处理下的春玉米产量间无显著差异,DI1 灌溉水平比 FI 和 DI2 平均增产 5.5%和 8.3%。增施氮肥可提高春玉米水分利用效率,但施氮量超过 70 kg·hm⁻²水分利用效率显著降低;相同灌溉水平下,氮肥偏生产力随施氮量的增加而显著降低,N70、N140 和 N210 处理的氮肥偏生产力均值分别为 262.59、141.52 kg·kg⁻¹和 97.31 kg·kg⁻¹。综合考虑产量、经济效益和环境因素,在中国河西地区推荐春玉米的最适宜水氮组合为 DI1×N140,其产量达 23.68 t·hm⁻²,净效益达 25 390 元·hm⁻²。

关键词:春玉米;灌水量;施氮量;籽粒产量;水氮利用效率;经济效益

中图分类号:S513;S365 **文献标志码:**A

Effects of different irrigation and nitrogen application levels on the yield and water and nitrogen use efficiency of spring maize

MIN Di, WANG Zenghong, LI Yuannong, ZHANG Duo

(Key Laboratory of Ministry of Education for Agricultural Soil and Water Engineering in
Arid Area of Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to explore the optimal efficient combination of water and nitrogen (N) for the high-yield of spring maize in Hexi through field experiments, the different irrigation levels (95% θ_f , 80% θ_f , and 65% θ_f , the θ_f was the field soil-water holding capacity, and was designated as FI, DI1, and DI2) and N application rates (0, 70, 140 kg·hm⁻² and 210 kg·hm⁻², designated as N0, N70, N140, and N210) on spring corn yield, water and N use efficiency, and economic benefits were studied. The results showed that, both irrigation and N application increased the yield of spring maize. Under FI and DI2 irrigation conditions, spring maize yield significantly increased with increasing N application rate, the grain yield of N210 treatment was 21.8% and 18.8% higher than that of N0 treatment, respectively, but there was no significant difference between N140 and N210 treatments under DI1 irrigation. The average yield of DI1 was 5.5% and 8.3% higher than that of FI and DI2, respectively. Adding N fertilizer increased the water use efficiency of spring corn, but the amount of N should not exceed N70, otherwise the water use efficiency would be reduced. Under the same irrigation level, the partial productivity of N fertilizer obviously decreased with increasing N application, N70, N140, and N210 treatments were 262.59, 141.52, and 97.31 kg·kg⁻¹, respectively. Taking the yield, economic benefits and environmental factors into consideration, DI1×N140 was recommended as the most suitable water and N combination for spring corn in Hexi region of China,

收稿日期:2020-02-22

修回日期:2020-08-27

基金项目:国家自然科学基金(51979235);公益性行业科研专项资助项目(201503125);陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2019-YL)

作者简介:闵迪(1995-),女,贵州毕节人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉新技术。E-mail:514293515@qq.com

通信作者:王增红(1972-),女,山西运城人,副教授,主要从事节水灌溉理论研究。E-mail:xinongyangjijian@163.com

李援农(1962-),男,陕西大荔人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉新技术及 3S 技术应用研究。E-mail:liyuanong@nwsuaf.edu.cn

which resulted in a yield of $23.68 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the net benefit was $25\,390 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$.

Keywords: spring maize; irrigation; nitrogen application; grain yield; water and nitrogen use efficiency; economic benefits

玉米作为全球最重要的谷物之一,其产量的高低对人类粮食的供应至关重要。河西走廊是我国重要的玉米生产基地,气候异常、降雨不确定和分布不均造成的干旱是导致该地区粮食产量不稳定的主要因素^[1-2]。长期面临的水资源紧缺使农业用水矛盾日益突出^[3]。同时,不合理的灌溉模式和灌水量与当地偏砂壤的土壤质地造成农田渗漏严重^[4-5],导致水分利用效率较低。此外,该地区还存在过量施肥与施肥方式落后等问题^[6],在河西地区纯氮施用量高达 $525 \sim 600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[6-7],远远超出作物对养分的需求,造成农田生态系统中氮素盈余^[8],肥料利用效率低下,并导致一系列的环境问题^[9]。因此,发展节水灌溉技术,探究合理的水肥管理模式,提高农田水肥利用效率,对于保障该地区粮食安全,缓解水资源短缺,改善农田生态环境,确保区域农业的可持续发展具有重要意义^[10]。

滴灌水肥一体化技术能有效提高作物根区水肥分布的均匀度^[11],维持作物高产的同时能有效降低水肥投入,从而提高水肥利用效率^[12]。在砂质土壤玉米生产区采用滴灌比传统灌溉的水分利用效率更高^[13],覆膜可以减少土壤蒸发,提高土壤温度,改善耕层土壤环境^[14-15],从而促进植株生长^[16]。目前,关于灌水量和施氮量耦合处理对大田玉米生长特性^[17]、产量^[18-19]、土壤水分养分^[20-21]、作物水肥利用效率^[22-23]的研究成果很丰富,但膜下滴灌条件下,水氮耦合对河西走廊大田玉米水氮利用效率和灌溉经济效益的研究成果较少。因此,本文通过设置不同灌水和施氮水平组合处理,研究春玉米地上干物质量、氮素累积量、籽粒产量及水氮利用效率对水氮组合的响应,评价各处理下的经济效益,从而确定适宜的供水供氮水平,为河西地区春玉米节水、节肥和增效的生产模式提供一定理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于 2018 年 4 月—2018 年 9 月在甘肃省武威市凉州区石羊河流域实验站进行。该区海拔 $1\,581 \text{ m}$,多年平均降水量 164 mm (主要集中在 7、8、9 月份),多年平均水面蒸发量 $2\,000 \text{ mm}$,为典型的内陆荒漠气候区,2018 年玉米生育期(2018 年 4 月 23 日—2018 年 9 月 22 日)共计降雨 193 mm (如图

1)。光热资源充足,全年日照时数大于 $3\,000 \text{ h}$,年平均气温为 8°C ,无霜期大于 150 d ^[24],多年平均风速为 $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。土壤质地为轻砂壤土,有机质含量为 $43.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。田间农家肥(主要为羊粪)含量为 $18 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。地表 1 m 深度内土层土壤容重为 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,平均田间持水量为 30% (体积含水量),地下水埋深达 $25 \sim 30 \text{ m}$ 。站内设有普通气象站,按照国家气象局的《地面气象观测规范》进行气温、湿度、降水、日照、水面蒸发、风速、气压和地温的观测,并设有自动气象站记录气温、相对湿度、太阳辐射和风速。试验玉米品种为先玉 335 号。

1.2 试验设计

试验采用膜下滴灌的方式进行灌溉,试验设置 3 个灌溉水平,分别为充分灌溉(FI),轻度亏缺灌溉(DI1),重度亏缺灌溉(DI2)。灌水量采用灌水上限控制,分别为 $95\% \theta_f$ (土壤田间持水量), $80\% \theta_f$, $65\% \theta_f$ 。灌水前采用取土烘干称重测定土壤含水率,灌水量 = (灌水上限 - 土壤含水率) × 土壤容重 × 计划湿润层深度 × 湿润比,为保证出苗,播前各处理采用畦灌冬储灌溉。施肥采用 4 个施氮水平,分别为 0 、 70 、 140 、 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (尿素,含氮量 46% ,以纯 N 计),各记为 N0、N70、N140 和 N210,氮肥在拔节期用施肥罐随滴灌分 2 次施加。试验共 12 个处理,每个处理重复 3 次,各个小区均为南北走向,小区面积 36 m^2 ($8 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$)。玉米采用宽窄行播种(宽行 60 cm ,窄行 40 cm)和一条滴灌带控制 2 行春玉米种植方式,株距 20 cm ,种植密度为 $100\,000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,滴灌带滴头间距 30 cm ,滴头流量 $2.5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,工作压力 0.1 MPa 。春玉米生育期内灌水量和灌水日期如表 1。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 春玉米地上部干物质量 春玉米成熟后,在每个小区选取 5 株有代表性的植株,齐地剪断,去除表面污垢后将各器官分离,于烘箱 105°C 杀青 0.5 h ,然后于 75°C 烘干至恒重后,用电子天平(量程 100 g ,精度 0.01 g)称干重并记录,最后乘以种植密度换算成群体生物量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.2 春玉米地上部氮素累积量 将烘干后的各器官干物质粉碎、过筛,用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消煮法消煮植物样品,然后用全自动凯氏定氮仪测定消解液中全氮含量。

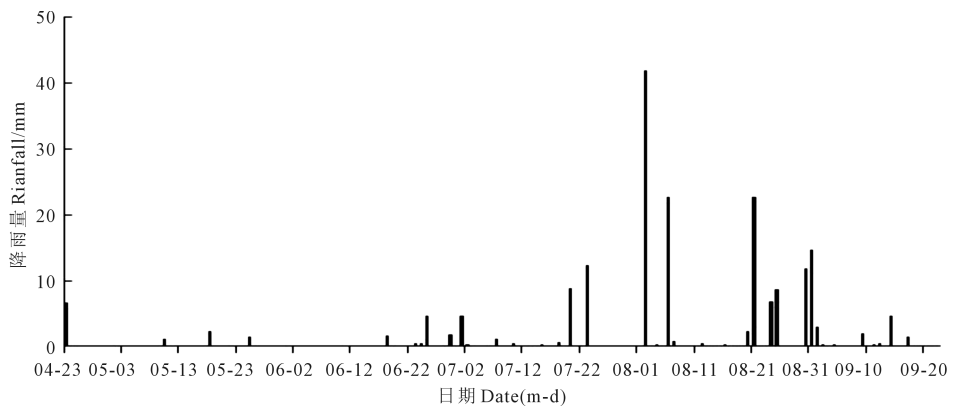


图 1 2018 年玉米生育期内降雨情况

Fig.1 Rainfall during maize growing season in 2018

表 1 春玉米滴灌灌水试验方案

Table 1 Irrigation schedule of treatments for spring maize

灌溉水平 Irrigation level	施氮水平 N level	灌水日期及实际灌水量/mm Irrigation date and actual irrigation amount							总灌水量/mm Total irrigation amount
		04-21	06-11	06-22	07-09	07-21	08-01	08-12	
F1	N210	78.8	64.0	57.5	77.9	55.6	51.6	56.8	442.2
	N140	44.4	76.4	58.7	45.0	42.8	39.3	19.9	326.5
	N70	48.8	66.8	63.4	30.9	39.9	17.3	0.0	267.1
	N0	55.0	55.6	52.0	24.4	48.6	10.6	16.6	262.7
DI1	N210	60.1	49.6	36.9	53.5	61.3	0.0	43.0	304.5
	N140	56.9	56.8	22.4	53.4	28.8	35.9	0.0	254.3
	N70	59.0	31.6	30.2	17.9	43.0	9.8	0.0	191.4
	N0	46.8	30.7	37.7	49.7	0.0	7.8	0.0	172.7
DI2	N210	53.3	41.9	37.9	35.1	1.2	48.2	5.4	223.0
	N140	52.4	26.9	37.3	24.2	9.4	9.4	6.1	165.7
	N70	55.0	24.0	31.9	14.6	18.0	10.8	0.0	154.5
	N0	42.8	20.1	25.1	21.8	12.9	6.8	0.0	129.6

注:施肥日期为 6 月 11 日和 7 月 9 日。
Note: Fertilization dates were June 11 and July 9.

各器官氮素累积量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)= 各器官全氮含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\times$ 器官干物质质量($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$) $\times$ 种植密度($\text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times 10^{-4}$;

地上部氮素累积量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)= 各器官氮素累积量之和。

1.3.3 籽粒产量 成熟期苞叶完全变白后,选取小区中间相邻 2 条滴灌带控制的 2 行玉米,连续取 10 株,将所有穗掰下,风干后脱粒测定总质量、穗粒数及其百粒质量,最终折算成含水率为 14%的籽粒产量^[25]。

1.3.4 春玉米耗水量和水氮利用效率 在播种前、每次灌水前和收获后测定 0~100 cm 土壤的含水率,用土钻在距离玉米植株 5~10 cm 处取土,每个小区 3 个测点,沿竖向每隔 20 cm 取 1 个土样,放入铝盒,在烘箱中烘干后测定土壤含水率。

播前和收后的土壤贮水量(mm)= 土壤干容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) $\times$ 土层厚度(cm) $\times$ 土壤含水率($\%$) $\times 10$;

春玉米耗水量采用水量平衡法计算,公式为

$$ET = Pr + U + I - D - R - \Delta W$$

式中, ET 为作物耗水量(mm); Pr 为有效降雨量(mm); U 为地下水补给量(mm); I 为灌水量(mm); R 为径流量(mm); D 为深层渗漏量(mm); ΔW 为播种时和收获后土壤贮水量之差(mm)。由于试验区地下水埋藏较深,地势平坦且降雨量较小,且滴灌湿润深度较浅, U 、 R 和 D 均忽略不计。

春玉米水分利用效率:

$$WUE = Y/ET$$

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

氮肥偏生产力(nitrogen partial factor productivity, $NPFP$)的计算公式如下:

$$NPFP = Y/N$$

式中, N 为投入的氮肥总量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

收获指数(harvest index, HI):

$$HI(\%) = \text{籽粒产量} / \text{地上部干物质累积量}$$

氮收获指数(nitrogen harvest index,*NHI*):

$$NHI(\%) = \frac{\text{籽粒吸氮量}}{\text{植株吸氮量}}$$

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 2010 软件对试验数据初步整理,用 SPSS 20.0 对各指标进行方差分析与多重比较,方差分析采用 ANOVA,多重比较采用 Duncan (D) 方法;采用 OriginPro 8.0 进行绘图。

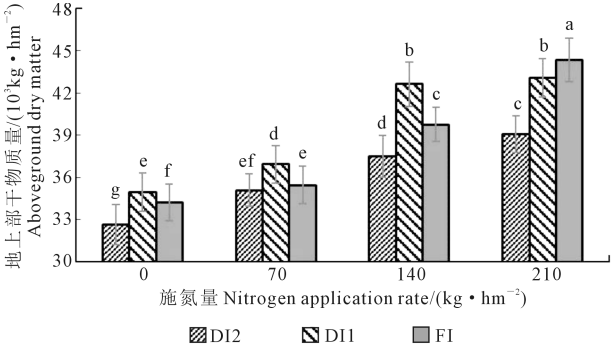
2 结果与分析

2.1 不同灌水与施氮量对地上部干物质量的影响

图 2 为灌水与施氮量对春玉米地上部干物质量的影响试验结果。

由图 2 分析知,灌水和施氮量对春玉米地上部干物质量存在显著影响。在相同灌溉水平下,春玉米地上部干物质量在 0~210 kg·hm⁻²的施氮范围内随施氮量的增加而增加。随着水分亏缺的加剧,地上部生物量呈下降趋势。DI2 灌溉水平下,春玉米地上部干物质量的变化范围为 32 640.3~39 053.0 kg·hm⁻²,干物质量随施氮量的增加增长缓慢;DI1 灌溉水平下的变化范围为 34 947.7~43 082.3 kg·hm⁻²,施氮量从 N70 增加到 N140,地上部干物质量显著增加,而由 N140 增加至 N210,地上部干物质量差异不显著;在 FI 灌溉水平下的变化范围是 34 199.7~44 326.7 kg·hm⁻²。与 DI2 处理相比,DI1 和 FI 处理的地上部干物质量分别高出 9.2%和 6.6%。

施氮量相同条件下,灌溉水平对地上部生物量的影响存在显著差异。施氮量不超过 140 kg·hm⁻²时,DI1 处理下的春玉米地上部干物质量显著大于



注:数据为各处理的平均值±标准差,不同字母代表不同灌溉处理间差异显著(*P*<0.05)。下同。

Note: Data points are mean and standard deviation for different irrigation and fertilizer treatments, different letters indicate significant difference among different irrigation treatments (*P*<0.05). The same below.

图 2 不同灌水与施氮量对春玉米地上部干物质量的影响
Fig.2 Effect of different irrigation and N application levels on aboveground dry matter of spring maize

FI 和 DI2 处理,且 DI1>FI>DI2;施氮量为 210 kg·hm⁻²时,FI 处理的地上部干物质量显著大于 DI1 和 DI2,且 FI>DI1>DI2。与不施氮(N0)相比,N70 处理下春玉米的地上部干物质量增幅达 3.7%~7.5% (*P*<0.05),N140 下增加 14.9%~22.0% (*P*<0.05),N210 下增加 19.6%~29.6% (*P*<0.05)。

2.2 不同灌水与施氮量对春玉米氮素累积量的影响

不同灌水和施氮量对春玉米氮素累积量的影响如图 3。在相同灌溉水平下,春玉米氮素累积量在 0~210 kg·hm⁻²的施氮范围内随施氮量的增加显著增加(*P*<0.05)。DI2 处理下,氮素累积吸收量的范围是 326.66~407.89 kg·hm⁻²,N70 和 N140 处理之间的差异不显著;DI1 处理下为 344.82~448.67 kg·hm⁻²;而 FI 处理下为 338.32~466.91 kg·hm⁻²,N0 和 N70 处理之间的差异不显著。分析可知,FI 处理下的氮素累积吸收量变化幅度大于 DI1 和 DI2 处理。与 DI2 相比,DI1 和 FI 处理的氮素累积量分别提高 8.0%和 5.4%。

在相同施氮水平下,施氮量不超过 140 kg·hm⁻²时,DI1 处理下的氮素累积吸收量显著大于 DI2 和 FI 处理;而施氮量为 210 kg·hm⁻²时,FI 处理下的氮素累积量显著大于 DI1 和 DI2 处理。与不施氮(N0)相比,N70 下春玉米氮素累积吸收量增加0.6%~9.5% (*P*<0.05),N140 下的增幅为 12.6%~18.2% (*P*<0.05),而 N210 下增加 24.9%~38.0% (*P*<0.05)。

2.3 不同灌水与施氮量对春玉米籽粒产量的影响

同一灌溉水平下,施氮对春玉米有显著的增产效应(表 2)。重度亏缺灌溉条件下,籽粒产量随施氮量的增加而显著增加;轻度亏缺灌溉条件下,N140 和 N210 处理之间无显著差异,说明过量施氮肥会阻碍籽粒产量的累积;充分灌溉条件下,施氮量对籽粒产量的累积有正效应。

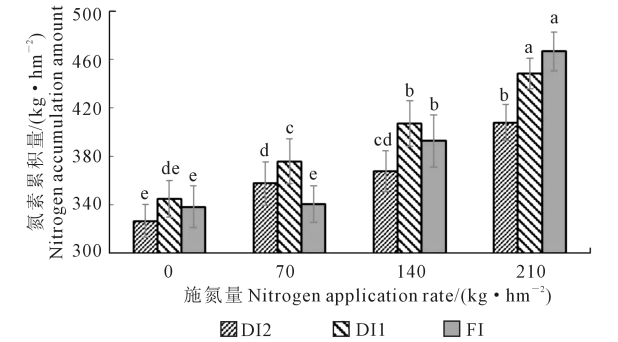


图 3 不同灌水与施氮量对春玉米氮素累积量的影响
Fig.3 Effect of different irrigation and N application levels on N accumulation of spring maize

与不施氮(N0)相比,N70 下的籽粒产量增幅为 2.9%~9.6% ($P<0.05$), N140 处理下的增产幅度为 12.1%~15.9% ($P<0.05$), 而 N210 处理下增加 12.2%~21.8% ($P<0.05$)。施氮量不超过 140 kg·hm⁻²时,DI1 处理下的籽粒产量显著大于 DI2 和 FI 处理;施氮量为 210 kg·hm⁻²时,DI1 和 FI 处理的籽粒产量无显著差异,并显著大于 DI2 处理。总的看来,DI1 灌溉水平的籽粒产量比 FI 和 DI2 平均高出

5.5%和 8.3%。

灌水与施氮水平对春玉米的穗粒数、百粒重有显著影响。各处理的穗粒数与百粒重的整体变化趋势与籽粒产量大致相同,与不施氮(N0)相比,处理 N70、N140、N210 的穗粒数和百粒重分别增加了 1.3%、2.6%、4.7%和 4.2%、10.9%、12.1%。说明施氮肥可以促进春玉米的生长,增加春玉米的穗粒数,使得其籽粒饱满,进而提高春玉米的产量。

表 2 不同灌水与施氮量对春玉米籽粒产量的影响

Table 2 Effect of different irrigation and N application levels on grain yield of spring maize				
灌溉水平 Irrigation level	施氮量 N application rate	籽粒产量/(×10 ³ kg·hm ⁻²) Seed yield	穗粒数 Grain number per spike	百粒重/g 100-grain weight
FI	N210	23.85±0.65a	672±9a	31.1±1.3a
	N140	22.26±0.47b	635±8bc	30.7±0.5a
	N70	20.15±0.64de	644±9bc	27.4±1.1a
	N0	19.58±0.51ef	646±9bc	26.6±0.3a
DI1	N210	23.70±0.25a	669±10a	31.1±0.2a
	N140	23.68±0.55a	670±19a	31.0±0.4a
	N70	22.08±0.40bc	638±9bc	30.4±0.4a
	N0	21.12±0.50cd	632±11bc	29.3±0.5a
DI2	N210	22.35±0.20b	638±7bc	30.7±0.2a
	N140	21.81±0.31bc	634±7bc	30.2±0.8a
	N70	20.63±0.37d	633±7bc	28.6±0.8a
	N0	18.82±0.29f	612±5d	27.0±0.6a
N		* * *	* * *	* * *
W		* * *	* * *	* * *
N×W		*	* *	*

注:同列不同小写字母表示相同灌溉量不同处理间差异显著($P<0.05$), * 表示 $P<0.05$; * * 表示 $P<0.01$; * * * 表示 $P<0.001$ 。下同。

Note: Different small letters in the same column mean significant difference among treatments in the same irrigation ($P<0.05$), * indicates $P<0.05$; * * indicates $P<0.01$; * * * indicates $P<0.001$.

2.4 不同灌水与施氮量对春玉米耗水量和水氮利用效率的影响

不同灌水和施氮量对春玉米耗水量的影响显著(如表 3)。在同一灌溉水平下,春玉米耗水量随施氮量的增加而增加。与不施氮(N0)相比,FI、DI1 和 DI2 下各施氮处理的耗水量分别增加 1.7%~50.8%、10.8%~38.7%和 19.2%~31.0% ($P<0.05$)。在相同施氮量下,春玉米耗水量随灌溉水平的提高而增加。与 DI2 相比,DI1 和 FI 下的耗水量增幅分别为 23.9%~53.4%和 72.9%~102.7% ($P<0.05$)。

由表 3 分析知,不同灌水和施氮处理对春玉米水分利用效率影响显著($P<0.05$)。不同处理的水分利用效率在 3.16~5.63 kg·m⁻³,水分利用效率最大的处理是 DI2 灌溉水平下的 N70。相同施氮水平下,DI2 处理的水分利用效率最高,变化范围为 4.92~5.63 kg·m⁻³,比 DI1 和 FI 处理分别高出 22.8%~38.5%和 39.1%~56.5%。综上,同一施氮水平下,水分利用效率随灌溉水平的提高而降低。相同灌溉

水平下,春玉米的水分利用效率随施氮量的增加呈先增后减的变化趋势。在 N70 处理下的水分利用效率最高,比 N0、N140 和 N210 分别高出 0.0%~6.0%、13.5%~23.3%和 14.4%~31.2%。

不同灌水和施氮量对春玉米氮肥偏生产率的影响显著($P<0.05$)。在相同灌溉水平下,氮肥偏生产率随施氮量的增加显著减小,所有处理中以 DI1×N70 处理的氮肥偏生产率最高,为 276.63 kg·kg⁻¹,与 FI、DI2 的 N70 处理差异显著,后两者之间的差异不显著;N140 处理下氮肥偏生产率有相同变化规律;N210 处理下的氮肥偏生产率无显著差异。

不同灌水和施氮水平对氮收获指数和玉米收获指数有显著影响。不同水氮处理的氮收获指数在 63.8%~73.3%,在相同灌溉水平下,N70 处理下的氮收获指数最高。春玉米收获指数在 52.4%~59.6%,DI1 和 FI 条件下,春玉米的收获指数随施氮量的增加而减小,DI2 条件下,N70 处理的春玉米收获指数最高。

2.5 不同灌水与施氮量对春玉米经济效益的影响

表 4 为不同处理下春玉米的经济效益分析。
DI1×N140 处理下净效益最大,净收益为 25 390 元·hm⁻²。在 FI 和 DI2 下,春玉米的净收益随施氮量的增加而逐渐增加。在 FI 条件下,N210 处理的平均净收益为 24 846 元·hm⁻²,比 N140、N70 和 N0 处理下分别高出 2 528 元、6 112 元和 6 921 元;在 DI2 条件下,N210 处理的平均净收益为 22 567 元·hm⁻²,比 N140、N70 和 N0 处理下分别高出 576 元、2 555 元和 5 727 元。在 DI1 条件下,N140 处理下获得的净收益最大,平均为 25 390 元·hm⁻²,比 N210、N70 和 N0 处理下分别高出 418 元、2 666 元和 4 186 元。3 种灌溉水平条件的净收益相比,DI1 处理的平均净收益最大,其均值比 FI 和 DI2 处理分别提高 12.5%和 15.8%。
施氮量相同时,N210 处理下的净效益随灌水量的增加呈先增后减趋势,而在 N140、N70 和 N0 处理下,净效益在随灌水量的增加先增后减。4 个施氮水平下的净效益相比,N210 处理的净效益最大,平

均净效益为 24 128 元·hm⁻²,N140、N70 和 N0 处理的平均净效益分别为 23 233 元·hm⁻²、20 490 元·hm⁻²和 18 656 元·hm⁻²。与不施氮(N0)相比,N70、N140 和 N210 处理的净效益分别提高 9.8%、24.5%和 29.3%(平均)。

3 讨 论

3.1 春玉米地上部干物质质量、氮素累积量和籽粒产量

本研究表明,作物的高产是建立在高生物量的基础之上,春玉米地上部干物质质量、氮素累积量和籽粒产量对灌水和施氮量的响应呈单峰曲线变化,这与高磊等^[26]和王宜伦等^[27]的研究结果相同。水分胁迫会显著影响植物生长,但是增加氮肥施用量可以减少水分胁迫的危害。施氮促进玉米的植株生长和根系发育,从而更好地适应水分胁迫^[28]。于亚军等^[29]认为,水分胁迫会使施氮的增产效应减小,而水分充足施氮的增产效应显著增加。在 FI 和 DI2 处理下,地上部干物质质量随着施氮量的增加而显

表 3 不同灌水与施氮量对春玉米耗水量和水分利用效率的影响

Table 3 Effect of different irrigation and N application levels on ET and WUE of spring maize						
灌溉水平 Irrigation level	施氮量 N application rate	ET/mm	WUE /(kg·m ⁻³)	NPFP /(kg·kg ⁻¹)	NHI/%	HI/%
FI	N210	662.6a	3.16f	99.60f	64.4ef	47.2h
	N140	582.9b	3.17f	139.48d	63.9f	47.9gh
	N70	452.6de	3.91e	252.56b	70.3b	49.9def
	N0	439.5e	3.91e		67.9cd	50.2de
DI1	N210	535.5c	3.88e	98.99f	63.8f	48.3fgh
	N140	472.9d	4.39d	148.40c	66.1de	48.7efg
	N70	380.8f	5.09bc	276.63a	73.3a	52.4ab
	N0	386.1f	4.80c		70.3b	53.0a
DI2	N210	399.1f	4.92c	93.34f	67.6cd	50.2cd
	N140	386.1f	4.96c	136.67d	70.3b	51.0bcd
	N70	321.5g	5.63a	258.57b	73.3a	51.6abc
	N0	304.6g	5.44ab		69.2bc	50.6cd

表 4 不同灌水与施氮量对春玉米经济效益的影响

Table 4 Effects of different irrigation and N application levels on economic benefits of spring maize									
灌溉水平 Irrigation level	施氮量 N application rate	收入 Income /(Yuan·hm ⁻²)	支出 Outcome/(Yuan·hm ⁻²)					净收益 Net profit /(Yuan·hm ⁻²)	排名 Rank
			滴灌系统 Drip irrigation system	肥料 Fertilizer	水电 Water and electricity	收获 Harvest	其他 Other		
FI	N210	46713	5500	6290	1327	750	8000	24846	3
	N140	43541	5500	5993	980	750	8000	22318	6
	N70	39483	5500	5697	801	750	8000	18735	10
	N0	38364	5500	5400	788	750	8000	17925	11
DI1	N210	46426	5500	6290	913	750	8000	24972	2
	N140	46397	5500	5993	763	750	8000	25390	1
	N70	43246	5500	5697	574	750	8000	22725	4
	N0	41373	5500	5400	518	750	8000	21204	8
DI2	N210	43776	5500	6290	669	750	8000	22567	5
	N140	42731	5500	5993	497	750	8000	21991	7
	N70	40422	5500	5697	463	750	8000	20012	9
	N0	36878	5500	5400	389	750	8000	16839	12

著增加,与冯亚阳等^[30]研究结果一致;而在 DI1 处理下,当施氮量从 140 kg·hm⁻² 升至 210 kg·hm⁻² 时,地上部干物质量不再显著提高,这说明在一定的灌溉水平下,过量施氮不会显著增加春玉米地上部干物质量,这与索东让等^[31]、Bu 等^[32] 和谷晓博等^[33-34] 的研究结果一致。当施氮量为 0~14 kg·hm⁻² 时,DI1 处理下的地上部干物质量和籽粒产量显著高于 FI 和 DI2 处理,说明适度的水分亏缺有利于干物质量和籽粒产量的增加^[35];而在施氮量为 210 kg·hm⁻² 时,地上部干物质量 FI>DI1>DI2 ($P<0.05$),而籽粒产量、氮素累积量 FI≈DI1>DI2,主要原因可能是供水供氮促进玉米的干物质累积,进而提高玉米籽粒产量,但是超过一定范围会使作物“徒长”,于增产无益。FI×N210 处理下的地上部干物质量、籽粒产量、氮素累积量均比其他处理高,这表明水分的增产效应随施氮量的增加而增大,氮肥的增产效应随水分增加而增大,但这种增产效应不是无限制的^[30,36]。与不施氮相比,施氮处理增加了穗粒数和百粒重,这与郭丙玉等^[37] 的研究结果相同。与 Qi 等^[38] 和 Fang 等^[39] 的研究相比,本研究中不施氮处理的地上部干物质量、氮素累积量和籽粒产量处于较高水平,与施氮处理的差异不大,主要原因可能是播种前田间堆积了大量农家肥,导致土壤肥力偏高,减小了施肥的增产效应。

3.2 耗水量和水氮利用效率

本研究表明,灌水与施氮水平对春玉米的耗水量、水分利用效率、偏氮肥生产力、氮收获指数和收获指数均有显著影响。灌水和施氮水平越高,春玉米耗水量和籽粒产量越大,但水分利用效率最高的处理是 DI2×N70,产量最大时的耗水量远高于 WUE 最大时的耗水量,这与李文惠等^[40] 和刘战东等^[41] 的研究结果相同。可见水分和氮素作为影响玉米产量的 2 个重要因素,只有采取最佳组合才能够更好地提高玉米产量并达到节水的目的。同一灌溉水平下,增施氮肥可提高春玉米水分利用效率,但施氮量不宜超过 70 kg·hm⁻²,否则将导致水分利用效率降低^[42],原因可能是适量施氮通过提高春玉米籽粒产量从而提高了水分利用效率^[43];大量施氮导致水分利用效率降低,可能是因为大量施氮促进水分的消耗,增大了作物的耗水量,从而导致水分利用效率低下^[44-45]。吴立峰等^[46] 指出,施肥量和灌水量对棉花的肥料偏生产力有着极显著的交互作用。氮素对籽粒产量有重要作用,Yang 等^[47] 和 Xue 等^[48] 的研究发现,氮肥偏生产力随着施氮量的增加而下降,本研究结果与之相同。

3.3 经济效益分析

前人研究表明,适度的施氮和灌水均能增加作物产量,以此达到较高的经济效益。在本研究中,在充分灌溉条件下,增大施氮量可以有效增加春玉米的净收益;在轻度亏缺和重度亏缺灌溉条件下,N140 处理获得的净收益最高,说明充分灌溉条件下增施氮肥有利于提高春玉米的经济产量,而调亏灌溉条件下减少氮肥用量更有利于增加春玉米的经济产量,这与姜小凤等^[49] 和王秀波等^[50] 对小麦的研究结果相符。在所有处理中,FI×N210 处理的籽粒产量最高,但获得净收益最高的是 DI1×N140 处理,主要是因为前者为获得高产投入了过量的水和氮,导致成本过高,增产效果却不显著。相比较 FI×N210 处理,DI1×N140 处理不但获得高收益,而且节水节肥(节水 189.71 mm,节约氮肥 70 kg·hm⁻²),缓解水资源紧缺的局面,改善因滥用氮肥导致的环境问题。

4 结 论

本文研究滴灌条件下不同水氮供应对河西春玉米生长、产量及水氮利用效率的影响,结果表明:

1) 灌水和施氮均可使春玉米产量增加,在水分胁迫条件下,施氮可以减少水分胁迫的危害,但过量施氮肥对春玉米不再有显著的增产效果,适度的水分亏缺和适宜的施氮量可以保证春玉米增产,DI1 灌溉水平比 FI 和 DI2 平均增产 5.5% 和 8.3%。

2) 增施氮肥可提高春玉米水分利用效率,但施氮水平不宜超过 70 kg·hm⁻²,否则将导致水分利用效率降低;氮肥偏生产力随施氮量的增加呈明显降低趋势,N70、N140 和 N210 处理的氮肥偏生产力分别为 262.59、141.52 kg·kg⁻¹ 和 97.31 kg·kg⁻¹。

3) 综合考虑产量、经济效益和环境因素,在中国河西地区春玉米最适宜的水氮组合为 DI1×N140,产量为 23.68 t·hm⁻²,净效益为 25 390 元·hm⁻²。

参 考 文 献:

[1] Zhao H, Wang R Y, Ma B L, et al. Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rain-fed ecosystem [J]. Field Crops Research, 2014, 161: 137-148.

[2] Hu Q, Pan F F, Pan X B, et al. Effects of a ridge-furrow micro-field rainwater-harvesting system on potato yield in a semi-arid region [J]. Field Crops Research, 2014, 166:92-101.

[3] 赵引,毛晓敏,薄丽媛. 覆膜和灌水处理下土壤水分动态与玉米生长模拟研究[J]. 农业机械学报. 2018, 49(9): 195-204.

[4] 王敏,张胜全,方保停,等. 氮肥运筹对限水灌溉冬小麦产量及氮素利用的影响[J]. 中国农学通报,2007,23(7): 349-353.

[5] 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.

- [6] 张掖,秦晓霞. 制种玉米氮素适宜用量的研究[J]. 农业科技与信息, 2007,(3): 16-17.
- [7] 张鹏,张富仓,吴立峰,等. 不同灌水和施氮对河西绿洲春玉米生长、产量和水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011, 29(4): 137-143.
- [8] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China - Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2-3):117-127.
- [9] St. Luce M, Whalen J K, Ziadi N, et al. Chapter two- Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils [C]// Sparks D L. Advances in Agronomy, UK: Elsevier Inc., 2011: 112, 55-102.
- [10] Wu Y, Jia Z K, Ren X L, et al. Effects of ridge and furrow rainwater harvesting system combined with irrigation on improving water use efficiency of maize (*Zea mays* L.) in semi-humid area of China [J]. Agricultural Water Management,2015, 158:1-9.
- [11] Fan J L, Wu L F, Zhang F C, 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.
- [12] 张富仓,严富来,范兴科,等. 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.
- [13] Ibrahim M M, El-Baroudy 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.
- [14] 邹慧,黄兴法,龚时宏. 水分调亏对地下滴灌夏玉米田水热动态的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 72-77.
- [15] 李莎,李援农. 种植模式和灌溉对冬小麦生长、产量及品质的影响[J]. 节水灌溉,2012,(3): 6-9.
- [16] 王敏,王海霞,韩清芳,等. 不同材料覆盖的土壤水温效应及对玉米生长的影响[J]. 作物学报,2011, 37(7): 1249-1258.
- [17] 刘明,张忠学,郑恩楠,等. 不同水氮管理模式下玉米光合特征和水氮利用效率试验研究[J]. 灌溉排水学报,2018, 37(12): 27-34.
- [18] Eissa M A, Roshdy N M K. Effect of nitrogen rates on drip irrigated maize grown under deficit irrigation [J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(2):127-136.
- [19] 漆栋良,胡田田,宋雪. 适宜灌水施氮方式提高制种玉米产量及水氮利用效率[J]. 农业工程学报,2018, 34(21): 98-104.
- [20] Wei C C, Li F H, Yang P L, et al. Effects of irrigation water salinity on soil properties, N_2O emission and yield of spring maize under mulched drip irrigation [J]. Water,2019, 11(8):1548.
- [21] 魏永霞,马瑛瑛,刘慧,等. 调亏灌溉下滴灌玉米植株与土壤水分及节水增产效应[J]. 农业机械学报,2018, 49(3): 252-260.
- [22] Sui J, Wang J D, Gong S H, 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.
- [23] 尚文彬,张忠学,郑恩楠,等. 水氮耦合对膜下滴灌玉米产量和水氮利用的影响[J]. 灌溉排水学报,2019, 38(1): 49-55.
- [24] 冉辉. 西北旱区制种玉米生长与产量对土壤水氮的响应及模拟研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
- [25] 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.
- [26] 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]. 植物营养与肥科学报, 2017,23(5): 1215-1224.
- [27] 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.
- [28] Gevrek M N, Atasoy G D. Effect of post anthesis drought on certain agronomical characteristics of wheat under two different nitrogen application conditions [J]. Turkish Journal of Field Crops, 2012, 17(1):19-23.
- [29] 于亚军,李军,贾志宽,等. 旱作农田水肥耦合研究进展[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(3): 220-224.
- [30] 冯亚阳,史海滨,李瑞平,等. 膜下滴灌水氮耦合效应对玉米干物质与产量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2018, 36(8): 750-755.
- [31] 索东让,李隆,孙宁科,等. 河西走廊制种田与生产田玉米需肥特点比较[J]. 植物营养与肥科学报,2013, 19(4): 816-823.
- [32] Bu L D, Liu J L, Zhu L, et al. Attainable yield achieved for plastic film-mulched maize in response to nitrogen deficit [J]. European Journal of Agronomy,2014, 55:53-62.
- [33] 谷晓博,李援农,黄鹏,等. 种植方式和施氮量对冬油菜产量与水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2018, 34(10): 113-123.
- [34] 谷晓博,李援农,黄鹏,等. 水氮互作对冬油菜氮素吸收和土壤硝态氮分布的影响[J]. 中国农业科学,2018, 51(7): 1283-1293.
- [35] Du T S, Kang S Z, Sun J S, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China [J]. Agricultural Water Management,2010, 97(1):66-74.
- [36] 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): 88-90.
- [37] 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.
- [38] Qi D L, Hu T T, Song X, et al. Effect of nitrogen supply method on root growth and grain yield of maize under alternate partial root-zone irrigation [J]. Scientific Reports,2019, 9:8191.
- [39] Fang J, Su Y Z. Effects of soils and irrigation volume on maize yield, irrigation water productivity, and nitrogen uptake [J]. Scientific Reports,2019,9(1):7740.
- [40] 李文惠,尹光华,谷健,等. 膜下滴灌水氮耦合对春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志,2015, 34(12): 3397-3401.
- [41] 刘战东,肖俊夫,刘祖贵,等. 膜下滴灌不同灌水处理对玉米形态、耗水量及产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2011, 30(3): 60-64.
- [42] 金修宽,马茂亭,赵同科,等. 测墒补灌和施氮对冬小麦产量及水分、氮素利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2018, 51(7): 1334-1344.
- [43] Edmonds D E, Tubana B S, Kelly J P, et al. Maize grain yield response to variable row nitrogen fertilization [J]. Journal of Plant Nutrition,2013, 36(7):1013-1024.
- [44] 谢英荷,栗雨,洪坚平,等. 施氮与灌水对夏玉米产量和水氮利用的影响[J]. 植物营养与肥科学报,2012, 18(6): 1354-1361.
- [45] 黄鹏,李援农,谷晓博,等. 覆膜条件下不同施氮量对花生产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉,2018,(12): 104-108.
- [46] 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 and 产量的影响[J]. 农业工程学报,2014, 30(20): 137-146.
- [47] Yang X L, Lu Y L, Tong Y A, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat-maize rotation system; Comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization[J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2015, 199: 34-42.
- [48] Xue X R, Mai W X, Zhao Z Y, et al. Optimized nitrogen fertilizer application enhances absorption of soil nitrogen and yield of castor with drip irrigation under mulch film [J]. Industrial Crops and Products, 2017, 95:156-162.
- [49] 姜小凤,郭建国,董博,等. 水氮互作对旱地春小麦氮肥利用效率和经济产量的影响[J]. 麦类作物学报,2018, 38(9): 1105-1111.
- [50] 王秀波,上官周平. 干旱胁迫下氮素对不同基因型小麦根系活力和生长的调控[J]. 麦类作物学报,2017, 37(6): 820-827.