植物营养与肥料学报 2012,18(6):1354-1361
Plant Nutrition and Fertilizer Science

施氮与灌水对夏玉米产量和水氮利用的影响

谢英荷[1], 栗 丽[1], 洪坚平[1], 王宏庭[2], 张 璐[1]
(1 山西农业大学资源环境学院,山西太谷 030801; 2 山西省农业科学院土壤肥料研究所,山西太原 030031)

摘要:通过田间裂区试验,研究了不同灌水量(900、1200 和 1500 m^3/hm^2)和施氮量(0、150、210 和 270 kg/hm^2)对夏玉米生长状况、产量构成及水、氮利用效率等的影响。结果表明:当灌水量超过最低量 900 m^3/hm^2、施氮量超过 150 kg/hm^2 时,二者对玉米产量、产量构成因素(穗粒数、百粒重及穗粒重)和收获指数(HI)以及各生育期干物质积累量等均没有明显影响;氮肥农学效率和氮肥偏生产力随氮肥用量的增加呈明显降低趋势;灌水生产效率和水分利用效率随灌水量的增加也显著降低,二者均表现为 900 m^3/hm^2 > 1200 m^3/hm^2 > 1500 m^3/hm^2。因此,在本试验条件下,以 $W_{900}N_{150}$ 处理的水、氮利用效率、产量及其构成因素等较高,并且对环境造成潜在危害最小,为当地地域气候条件下夏玉米生产中节水减氮的较为适宜的水氮配比。

关键词:夏玉米;施氮量;灌水量;产量;水氮利用
中图分类号:S513.06　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2012)06-1354-08

Effects of nitrogen application and irrigation on grain yield, water and nitrogen utilizations of summer maize

XIE Ying-he[1], LI Li[1], HONG Jian-ping[1], WANG Hong-ting[2], ZHANG Lu[1]
(*1 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;*
2 Institute of Soil and Fertilizer, Shanxi Academy of Agricultural Science, Taiyuan 030031)

Abstract: A field experiment using the split-plot design was carried out to investigate the effects of nitrogen and irrigation on growth of summer maize, yield components, and water and nitrogen use efficiencies. There were three irrigation levels, 900 (W_{900}), 1200 (W_{1200}), and 1500 m^3/ha (W_{1500}) in main plots and four nitrogen levels, 0(N_0), 150 (N_{150}), 210 (N_{210}), and 270 kg/ha (N_{270}) in sub-plots. The results show that the effects of nitrogen and irrigation on grain yield, yield components (grains per spike, 100-grain weight and grain weight per spike), harvest index (HI) and aboveground dry matter at each growth stage of summer maize are not significantly different when the irrigation rate is higher than 900 m^3/ha and the nitrogen application rate is higher than 150 kg/ha. The nitrogen agronomic efficiency (NAE) and partial factor productivity of the applied N (NPFP) are decreased with the increase of the nitrogen application, and the water productivity (WF) and water use efficiency (WUE) are also decreased significantly with the increase of the irrigation rate (900 m^3/ha > 1200 m^3/ha > 1500 m^3/ha). In the present experiment, the optimal combination of nitrogen rate and irrigation rate is $W_{900}N_{150}$ for the higher grain yield, yield components and water use efficiency, which has lower potential harm for environment.

Key words: summer maize; nitrogen application rate; irrigation rate; grain yield; utilization of water and nitrogen

水肥是影响作物产量的两大主要限制因子,尤其是干旱半干旱地区,适当的水肥条件在高效农业生产中起着至关重要的作用[1]。这方面许多人已进行过长期研究[2],但多偏重于水、氮等单因子效应方面,以及水、氮互作对作物和土壤硝态氮淋溶和累积规律的研究[3-5],而对水氮交互作用对于水分利用尤其是在夏玉米上的研究则较少[6],而且对于某种作物而言,合理的氮肥施用量和灌溉水平

收稿日期:2012-02-09　　**接受日期**:2012-07-23
基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BADA4B07-1)资助。
作者简介:谢英荷(1958—),女,山西原平市人,博士,教授,主要从事土壤肥力与环境研究。Tel:0354-6288322, E-mail:xieyinghe@163.com

(水氮配比)的确定往往需要结合不同的农业生产环境,诸如气候、作物品种、土壤特征等因素综合考虑,这就使施肥和灌溉对作物生长和水、氮利用效率的影响具有了区域和地域特征[7]。

晋南是山西夏玉米主产区,并主要集中栽培在水肥条件较好的农田,具有较大的增产潜力。但近年来农民为了高产,盲目施肥,特别是氮素的投入较高(最高可达600 kg/hm^2 左右[8]),但增产效果不显著,而且当地水资源又严重短缺,灌溉耗水量大,造成了当地水肥资源的大量浪费。基于此,本试验通过研究不同施氮量和灌水量对晋南地区夏玉米产量及水氮利用等的影响,为探求该地区玉米生产中的高产高效、减氮节水、环境友好的水氮配比提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于2009年6月～10月在山西省襄汾县农场进行。该区属暖温带大陆性季风气候,多年平均降水量为510 mm,年均蒸发量1732.2 mm,年均气温12.4℃,无霜期186.3 d。供试土壤为石灰性褐土,土壤质地中壤,0—40 cm土层土壤养分状况见表1。试验地前茬作物为冬小麦。

表1　试验地0—40 cm土层基础理化性状

Table 1　Basic physico-chemical properties of the experiment soil (0–40 cm)

土层 Depth (cm)	pH	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Alk.-hydrol. N (mg/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	容重 Bulk density (g/cm^3)	田间持水量(%) Field water capacity
0—20	8.13	12.48	0.58	47.04	14.69	209.03	1.36	31.78
20—40	8.10	8.31	0.40	29.17	6.88	162.16	1.44	27.09

试验采用完全随机裂区设计,主区为灌溉量,设3个水平(m^3/hm^2),分别为:900(W_{900})、1200(W_{1200})、1500(W_{1500}),当地的平均灌溉量为1200 m^3/hm^2 左右。副区为施氮量,设4个水平(N kg/hm^2),分别为:不施氮肥(N_0)、150(N_{150})、210(N_{210})、270(N_{270}),当地夏玉米的平均施氮量为210 kg/hm^2 左右。共12个处理,重复3次,小区面积4 m×12 m,随机排列;为消除小区间的水分和氮素移动,主区之间设2 m人行道,副区之间设1 m人行道。在夏玉米生育期分别于拔节期和喇叭口期灌水2次(不包括生育期降水),灌水量用潜水泵抽水时间控制。夏玉米生育期降水量为195.8 mm。

试验地前茬作物为冬小麦。2009年6月10日冬小麦收割后硬茬复播夏玉米(*Zea mays* L.),常规平作,不起垄,行宽55～60 cm,品种为郑单958,播种方式为点播,播种密度为6×10^{4}株/hm^2。

试验用氮肥为尿素(含N 46%),施用量为拔节期40%和喇叭口期60%,均随灌水施入,不施磷肥和钾肥。播前0—20、20—40、40—60、60—80、80—100、100—120、120—140、140—160、160—180、180—200 cm土层土壤水分平均含量分别为9.09%、8.99%、6.94%、8.01%、8.65%、9.51%、10.09%、9.34%、9.67%和8.70%。

1.2　样品采集和测定

播前和收获后分别在各小区内用土钻采集0—200 cm深的土样,每小区3钻,每20 cm分为一层,按取样层次等层混合,土样带回实验室后部分新鲜土样用烘干法测定土壤含水量。其余土样风干,过1 mm筛备用。

土壤有机质用外加热法,全氮用半微量凯氏法[9],速效磷用0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提—钼蓝比色法[9],速效钾用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法[9]测定;土壤容重用环刀法测定,土壤pH用酸度计法测定[10]。

分别于夏玉米拔节期、喇叭口期、灌浆期和收获期在每小区选10株用于测定株高和生物量,收获期全区收获测产,并每区取样10株进行考种。

相关参数计算公式:

收获指数(HI,%) = 籽粒产量/地上部分生物量

灌溉水生产效率(WP,kg/m^3) = 灌溉区产量/灌水量

水分利用效率(WUE,kg/mm) = 产量/耗水量[11]

耗水量在田间条件下通常指作物的蒸散量(ET),可通过水量平衡方程计算[12]:

$$P+I=\triangle S+R+D+ET=(S_{fin}-S_{init})+R+D+ET$$

式中:P为生育期降水量;I为田间灌水量;S_{init}为播前土壤储水量;S_{fin}为收获后土壤储水量;R为径流量;D为渗漏量,本研究中R和D可忽略[13]。

氮肥农学效率(NAE,kg/kg)=(施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量[14]

氮肥偏生产力(NP,kg/kg)=施氮区产量/施氮量

试验数据用SPSS 15.0和Excel 2003软件进行处理和统计分析,用one-way ANOVA作方差分析,Duncan法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施氮和灌水对夏玉米生育期株高和地上部干物质积累量的影响

在同一施氮水平下,分别将3个灌溉处理的株高和地上部分干物质求平均值,得到4个施氮水平的平均株高和地上部分干物质量(图1和图2)。由图1和图2可知,除拔节期外(因拔节期才开始进行水肥处理),玉米株高和地上部分干物质量在各生育期所有施氮处理均显著高于不施氮处理($P<0.05$);但N_{150}、N_{210}和N_{270}处理间的平均株高和干物质积累量大多差异不显著。说明在施氮150 kg/hm^{2}基础上,再继续增加施氮量,对玉米的株高和干物质积累已无明显促进作用。

在同一灌溉水平下,将4个施氮处理的株高和地上部分干物质求平均值,得到3个灌溉水平的平均株高和地上部分干物质量。由图1和图2可知,除拔节期外,各生育时期株高均随灌水量的增加而增加;喇叭口期,中、高水量的W_{1200}、W_{1500}显著高于低水量的W_{900}处理,但中、高水量之间差异不显著;灌浆期,高水量的W_{1500}显著高于中、低水量的W_{1200}、W_{900}处理,但中、低水量之间差异不显著;成熟期,3个灌溉水平的平均株高均无显著差异。说明灌水对玉米生育中期的生长影响较大,而对成熟期影响较小。3个灌溉水平的平均地上部分干物质积累量在夏玉米各个生育期均不存在显著差异,说明在低灌溉量W_{900}处理下如果继续增加灌溉量对夏玉米干物质积累无明显促进作用。

2.2 施氮和灌水对夏玉米产量及其构成的影响

由表2可以看出,不同施氮和灌水处理下,夏玉米产量平均变动在7514.49～10087.76 kg/hm^{2}之间,以$W_{1500}N_{210}$处理最高,但其除了与各灌水处理下的不施氮肥区差异显著外,与其他所有处理间差异都不显著。相同灌水处理下,施氮处理的夏玉米产量显著高于不施氮处理($P<0.05$),且在中(W_{1200})、低量(W_{900})灌水处理下,产量随施氮量的增加而增加;在高灌水量处理下(W_{1500})施氮量低于210 kg/hm^{2}时,产量随施氮量的增加而增加,超过210 kg/hm^{2}时则略有下降;N_{150}、N_{210}和N_{270}处理的夏玉米平均产量(3个灌水处理平均)显著高于不施氮处理的产量($P<0.05$),且比不施氮处理分别

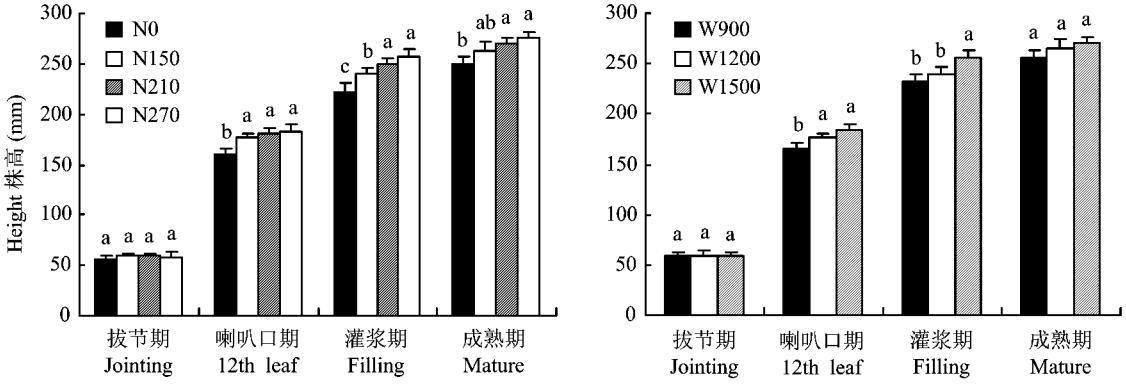

图1 水氮因子对夏玉米株高动态变化的影响

Fig. 1 Main effects of irrigation and nitrogen factors on the height of summer maize

[注(Note):图中方柱上不同写字母表示同一生育期不同处理间在5%水平差异显著($P<0.05$) Different letters above the bars indicate significant difference among different treatments at the 5% level ($P<0.05$) at the same growth stage.]

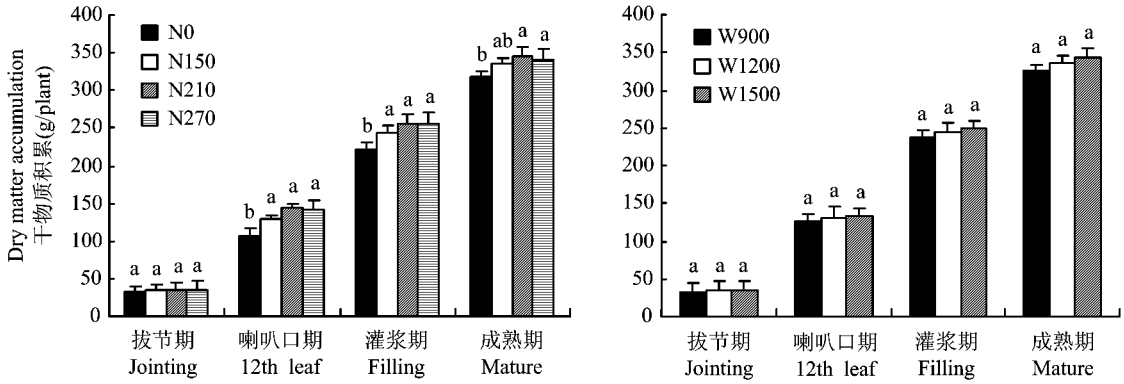

图 2　水氮因子对夏玉米地上部分干物质积累动态变化的影响

Fig. 2　Main effects of irrigation and nitrogen factors on the dry matter accumulation of summer maize

[注(Note): 图中柱上不同写字母表示同一生育期不同处理间在 5% 水平差异显著($P<0.05$) Different letters above the bars indicate significant difference among different treatments at the 5% level ($P<0.05$) at the same growth stage.]

增加了 23.68%、27.64% 和 28.81%; 但 3 个施氮水平之间差异不显著,而且 3 个灌水处理的产量平均值(4 个施氮处理平均)差异也不显著,说明灌水量为 900 m^3/hm^2,施氮量为 150 kg/hm^2 时就可以满足现在的产量水平,在此基础上若继续增加灌水量和施氮量,对产量的提高已不会有明显的作用。

不同施氮和灌水处理下,夏玉米收获指数(HI)平均变化于 40.85%～49.60% 之间,以 $W_{1500}N_{150}$ 处理最高,与上述产量的变化趋势一致,除了与各灌水处理下的不施氮肥区差异显著外,与其他所有处理间差异都不显著。在 W_{900} 灌水处理条件下,HI 随施氮量增加而增加,且施氮处理的 HI 显著高于不施氮处理($P<0.05$); 在灌水处理 W_{1200} 和 W_{1500} 中,HI 均以施氮量为 150 kg/hm^2 时最高,施氮量大于 150 kg/hm^2 时 HI 不再增加。将水、氮因子的 HI 平均值作比较,3 个灌水处理之间的 HI 差异不显著; 施氮处理夏玉米的 HI(3 个灌水处理平均值)显著高于不施氮处理($P<0.05$),但 3 个施氮处理之间没有显著差异。

不同水、氮处理的穗粒数、百粒重、穗粒重的变化趋势基本与产量的变化相一致,各水分处理下,施氮肥区显著高于不施氮处理($P<0.05$),并随施氮量的增加而增加,以中、高氮处理区最高,但低、中、高氮处理间却差异不显著。3 个灌水处理之间的穗粒数、百粒重、穗粒重差异也不显著。

将施氮量与灌水量作为固定因子,其他参数作为变量因子,得出固定因子的效应及其交互效应,并用多因素单变量的 Duncan 多重比较进行显著性检验。结果表明,灌水对产量、产量构成(穗粒数、百粒重及穗粒重)和收获指数(HI)没有显著影响; 但施氮与灌水的交互作用对这些指标却影响显著($P<0.01$)。从效应值结果也可以看出,灌水处理的效应值(η^2)均小于 0.25,施氮处理及其二者交互作用的效应值(η^2)均大于 0.4。

2.3　施氮和灌水对夏玉米水分利用效率的影响

由表 3 可以看出,不同施氮和灌水处理下总耗水量(ET)总的趋势是随灌水量和施氮量的增加逐步增加,以 $W_{1500}N_{270}$ 处理最高,为 316.17 mm,这除了与 $W_{1500}N_{210}$ 处理没有显著差异外,均显著大于其他所有处理,且 3 个灌水处理间和不同的氮素处理间均差异显著。说明灌水量和氮素用量的增加都会显著加大玉米生育期总耗水量(ET)。

各处理条件下,夏玉米水分利用效率变化幅度在 29.89～37.40 kg/mm 之间(表 3),总的趋势是随灌水量的增加逐步降低,即 $W_{900} > W_{1200} > W_{1500}$,且 3 个灌水量之间差异显著。中、高量灌水处理下均以中氮(N_{210})处理较高,高氮(N_{270})处理略有降低,但二者差异不显著; 所有处理中以 $W_{900}N_{210}$ 最高,但与低(W_{900})、中(W_{1200})量灌水处理下的各施氮处理差异均不显著,但却显著高于高量(W_{1500})灌水处理下的各施氮处理。各施氮处理下水分利用效率显著大于不施氮处理,但 3 个施氮水平间差异不显著。说明本试验条件下的不同施氮量对水分利用效率影响不明显。

表2 不同灌水和施氮水平对产量及其构成的影响

Table 2 Effects of irrigation and nitrogen supply levels on grain yield and its components

灌水处理 Irrigation rate	施氮处理 Nitrogen rate	产量 Grain yield (kg/hm^2)	收获指数 HI (%)	穗粒数 Grains per spike (No./spike)	百粒重 100-grain weight (g)	穗粒重 Grain wt. per spike (g/spike)
W_{900}	N_0	7514.5 b	41.95 c	520.28 b	28.84 c	150.29 b
	N_{150}	9222.2 a	47.32 ab	575.93 a	31.99 ab	184.44 a
	N_{210}	9798.7 a	47.93 ab	589.65 a	33.23 a	195.97 a
	N_{270}	10022.2 a	48.74 ab	599.42 a	33.44 a	200.44 a
W_{1200}	N_0	7846.2 b	40.85 c	532.13 b	29.49 c	156.92 b
	N_{150}	9694.1 a	49.00 a	591.21 a	32.77 ab	193.88 a
	N_{210}	9930.9 a	48.03 ab	600.22 a	33.09 a	198.61 a
	N_{270}	10054.7 a	48.20 ab	600.42 a	33.48 a	201.09 a
W_{1500}	N_0	8000.2 b	43.37 bc	521.48 b	30.68 bc	160.01 b
	N_{150}	9977.3 a	49.60 a	592.30 a	33.59 a	199.54 a
	N_{210}	10087.8 a	47.72 ab	596.82 a	33.82 a	201.75 a
	N_{270}	10013.2 a	47.68 ab	596.85 a	33.53 a	200.26 a
			F 检验 *F*-test (*P*)			
灌水量 Irrigation(IRR)		0.298^{NS}	0.819^{NS}	0.513^{NS}	0.100^{NS}	0.298^{NS}
施氮量 Nitrogen(NR)		0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
IRR×NR		0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**
			效应值 Effect size(η^2)			
灌水量 Irrigation(IRR)		0.081	0.014	0.045	0.153	0.081
施氮量 Nitrogen(NR)		0.748	0.575	0.732	0.706	0.745
IRR×NR		0.460	0.481	0.431	0.584	0.481

注(Note): 同一列中不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Different letters mean significant at $P<0.05$; NS 表示在0.05水平下差异不显著 NS refers to no significant difference between treatments at $P<0.05$; *, ** 分别表示在0.05和0.01水平下差异显著 *, ** refer to significant difference between treatments at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. η^2 表示效应值; 0.1～0.25为小效应; 0.25～0.40为中等效应; >0.40为高效应 η^2 means the effect size; 0.1–0.25 refers to low effect; 0.25–0.40 refers to moderately effect; >0.40 refers to high effect.

如不考虑降雨对夏玉米产量的贡献率,计算玉米的灌溉水生产效率(产量与灌水量的比值,WP),其变动幅度在5.33～11.13 kg/m^{3}之间(即每100 m^{3}的灌溉水在1 hm^{2}当地农田面积上可以生产533～1130 kg玉米),各处理的灌水生产效率的变化趋势与水分利用效率完全一致,W_{900}灌水处理最高,随灌水量的增加而逐步降低,且3个灌水量之间差异显著。在所有处理中,灌水生产效率以处理$W_{900}N_{270}$最高,但与W_{900}处理下的N_{210}和N_{150}之间均无显著差异,同时其他两个相同灌水处理下的不同施氮水平之间差异也不显著,但与不施氮处理的差异显著。

上述结果表明,当施氮量为150 kg/hm^{2}时,如继续增加氮素用量对水分利用效率和灌水生产效率已无明显促进作用;在灌水量为900 m^3/hm^{2}时,若再继续增加灌溉量,水分利用效率和灌水生产效率则呈显著降低趋势。

2.4 施氮和灌水对夏玉米氮素吸收利用的影响

表3表明,在收获期,同一灌水处理下,施氮处理的籽粒氮素吸收量显著高于不施氮处理($P<0.05$);当施氮量低于210 kg/hm^{2}时,籽粒氮素吸收量随施氮量的增加而显著增加,当超过210 kg/hm^2

表 3　不同灌水和施氮水平对夏玉米水氮利用的影响

Table 3　Effects of irrigation and nitrogen rates on the water and nitrogen utilization by summer maize

灌水处理 Irrigation rate	施氮处理 Nitrogen rate	总耗水量 ET (mm)	水分利用效率 WUE (kg/mm)	灌水效率 WP (kg/m^3)	籽粒吸氮量 Grain N absorption (kg/hm^2)	氮肥农学效率 NAE (kg/kg)	氮肥偏生产力 NPFP (kg/kg)
W_{900}	N_0	251.38 h	29.89 ef	8.35 b	62.48 f		
	N_{150}	255.69 h	36.07 ab	10.25 a	86.16 d	11.40 ab	58.53 b
	N_{210}	261.99 gh	37.40 a	10.89 a	109.66 bc	10.93 bc	44.03 c
	N_{270}	269.25 fg	37.22 a	11.13 a	117.5 ab	9.45 cd	36.42 cd
W_{1200}	N_0	274.21 ef	28.61 f	6.54 c	76.09 de		
	N_{150}	278.91 ef	34.76 abc	8.08 b	104.43 c	12.26 ab	57.38 b
	N_{210}	284.96 de	34.85 abc	8.27 b	127.67 a	9.91 c	41.34 c
	N_{270}	291.18 cd	34.53 abc	8.38 b	124 a	8.17 de	34.99 cd
W_{1500}	N_0	292.84 cd	27.32 f	5.33 d	69.09 ef		
	N_{150}	301.39 bc	33.10 cd	6.65 c	107.12 bc	12.98 a	67.83 a
	N_{210}	309.00 ab	32.65 cd	6.72 c	117.4 ab	9.67 c	44.16 c
	N_{270}	316.17 a	31.67 de	6.68 c	104.72 bc	7.43 e	37.09 cd
平均值 Mean							
灌水处理 Irrigation	W_{900}	259.58 c	35.15 a	10.76 a	93.95 a	10.59 a	46.33 a
	W_{1200}	282.32 b	33.19 b	8.24 b	108.05 a	10.11 a	44.57 a
	W_{1500}	304.85 a	31.19 c	6.68 c	99.58 ab	10.03 a	49.69 a
施氮处理 Nitrogen	N_0	272.81 d	28.61 b	6.74 b	69.22 b		
	N_{150}	278.66 c	34.64 a	8.33 a	99.24 a	12.21a	61.25 a
	N_{210}	285.32 b	34.97 a	8.63 a	118.24 a	10.17ab	43.18 b
	N_{270}	292.2 a	34.47 a	8.73 a	115.41 a	8.35b	36.18 c
F 检验 *F*-test(*P*)							
灌水量 Irrigation(IRR)		0.000**	0.001**	0.000**	0.080^{NS}	0.753^{NS}	0.196^{NS}
施氮量 Nitrogen(NR)		0.000**	0.000**	0.001**	0.001**	0.02*	0.001**
IRR × NR		0.000**	0.000**	0.000**	0.001**	0.052^{NS}	0.003**
效应值 Effect size(η^2)							
灌水量 Irrigation(IRR)		0.322	0.429	0.926	0.097	0.007	0.206
施氮量 Nitrogen(NR)		0.780	0.667	0.766	0.963	0.271	0.865
IRR × NR		0.499	0. 493	0.512	0.635	0.042	0.722

注(Note)：ET—Evapotranspiration；WUE—Water use efficiency；WP—Water productivity；NAE—Nitrogen agronomic efficiency；NPFP—Nitrogen partial factor productivity；同一列中不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$) Different letters mean significant at $P < 0.05$；NS 表示在 0.05 水平下差异不显著 NS refers to no significant difference between treatments at $P < 0.05$；*，** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平下差异显著 Refer to significant difference between treatments at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively. η^2 表示效应值 Means the effect size；0.1～0.25 为小效应 Refers to low effect；0.25～0.40 为中等效应 Refers to moderately effect；>0.40 为高效应 Refers to high effect.

时,在中、高灌水处理下籽粒氮素吸收量则有所降低,但与N_{210}处理差异不显著。高、中、低各不同灌水量处理之间籽粒氮素吸收量差异不显著。

由表3也可看出,氮肥农学效率在3个灌水处理中均以低氮N_{150}处理最高,并随施氮量的增加而显著降低,随灌水量的增加而有所提高,所有处理中以$W_{1500}N_{150}$处理的氮肥农学效率最大,但与中、低灌水下的低氮处理则差异不显著。

各处理氮肥偏生产力与农学效率有相同的变化趋势,各灌水处理中低氮处理显著大于中、高氮处理,但不同的灌水处理间差异不显著。因此从氮素利用的角度分析,以$W_{900}N_{150}$处理的经济和环境效益最高。

主效应分析结果表明,灌水处理、施氮处理及其二者的交互作用对水分利用效率和灌水效率均有显著影响,其效应值(η^2)均大于0.4;但灌水处理对氮肥农学效率的影响不显著,其效应值(η^2)均小于0.25(表3)。

3 讨论

施肥具有明显的调水作用,灌水也有显著的调肥作用[15];在一定范围内,肥料效应随土壤含水量的增加而提高。研究表明[16],适宜的水肥条件能够显著促进玉米植株的生长,增强其水分和养分的供给能力,进而提高产量。本试验条件下水氮配比为$W_{900}N_{150}$的处理,水分利用效率和灌水效率最高,氮肥农学效率和偏生产力最大,玉米产量、产量构成因素(穗粒数、百粒重及穗粒重)和收获指数HI以及各生育期地上部分干物质积累量均较高,而且这些指标与中、高灌水量、施氮量处理的最高值均无显著差异,部分指标在高水高氮处理下有所降低。因此从产量效应和资源利用、环境等综合效应方面考虑,推荐灌水量900m^3/hm^2和施氮量150 kg/hm^2($W_{900}N_{150}$)为当地节水减氮的适宜水氮配比,该水氮投入量远低于当地生产中的常规灌水量(1200 m^3/hm^2)和施肥水平(210 kg/hm^2)。玉米产量对水氮的反应,不同的区域环境,研究结果却不尽相同。钟茜等[17]对冬小麦/夏玉米轮作体系的研究表明,夏玉米最高产量时的施氮量为180 kg/hm^2;Fang等[15]在华北地区的研究表明,施氮量超过200 kg/hm^2时产量不再显著增加。徐杰等[16]对华北地区冬小麦/夏玉米轮作体系的研究表明,玉米施氮量120kg/hm^2,生育期不灌水,但降水量达480多毫米时,产量最高可达9079 kg/hm^2,刘小刚等[18]对西北地区春玉米研究结果是当籽粒产量最大为9953 kg/hm^2时,最佳施氮量为240 kg/hm^2,灌水量为1485.71 m^3/hm^2;薛亮等人[19]在西北地区陕西关中夏玉米研究结果是施氮量230 kg/hm^2,灌水量972 m^3/hm^2,产量4076 kg/hm^2;郭丽[20]等在河北藁城的试验结果,是在灌水量600 m^3/hm^2施氮480 kg/hm^2条件下(生育期降水量为416 mm),夏玉米最高产量可达10207 kg/hm^2,基本苗67500株/hm^2;杨荣等[7]在甘肃河西走廊沙地农田的试验表明,灌水量9000 ~ 10500 m^3/hm^2,施氮量225 kg/hm^2,产量可达11000 kg/hm^2左右,如施氮量超过225 kg/hm^2,产量不再增加。综上而言,气候、土壤等地域环境条件不同,得出的研究结果是各不相同的,本试验结果还需继续结合当地实际,经过多年大量的生产实践,进行进一步的深入研究和验证。

4 结论

1)当灌水量超过最低量900 m^3/hm^2时,玉米产量、产量构成因素(穗粒数、百粒重及穗粒重)和收获指数(HI)以及各生育期干物质积累量等对灌水量没有明显反应;但灌水生产效率和水分利用效率却是随灌水量的增加明显降低,均为900 m^3/hm^2 >1200 m^3/hm^2 >1500 m^3/hm^2,并且灌水生产效率在3个灌水量之间均差异显著,而水分利用效率是低量900 m^3/hm^2处理显著高于高量1500 m^3/hm^2灌水处理。

2)当施氮量超过150 kg/hm^2时,玉米产量、产量构成因素(穗粒数、百粒重及穗粒重)和收获指数(HI)、灌水生产效率、水分利用效率以及玉米生育期株高、干物质积累量等对施氮量均没有明显反应;氮肥农学效率和生产效率却随施氮量的增加明显降低,均为150 kg/hm^2 > 210 kg/hm^2 > 270 kg/hm^2,并且氮肥偏生产力在3个施氮量之间均差异显著,而氮肥农学效率是低量150 kg/hm^2处理显著高于高量270 kg/hm^2施氮处理。

3)综上所述,在本试验条件下,以处理$W_{900}N_{150}$的水氮利用率、产量及其构成因素较高,且对环境造成潜在危害最小,因此从产量效应、资源利用和环境等综合效应方面考虑,在当地地域气候条件下推荐灌水量900 m^3/hm^2,施氮量150 kg/hm^2为夏玉米节水减氮较为适宜的水氮配比。

参考文献:

[1] Norwood C A. Water use and yield of limited-irrigated and dryland corn[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64: 365-370.

[2] 潘晓莹, 武继承. 水肥耦合效应研究的现状与前景[J]. 河南农业科学, 2011, 40(10): 20-23.
Pan X Y, Wu J C. Current situation and prospects of water and

fertilizer coupling effects[J]. J. Henan Agric. Sci., 2011, 40(10): 20-23.

[3] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1358-1365.
Li L, Hong J P, Wang H T *et al*. Effects of nitrogen and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(6): 1358-1365.

[4] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 等. 水氮优化条件下在华北平原冬小麦/夏玉米轮作中化肥氮的去向[J]. 核农学报, 2009, 23(2): 334-340.
Pan J R, Ju X T, Liu X J *et al*. Fate of fertilizer nitrogen for winter wheat/summer maize rotation in North China Plain under optimization of irrigation and fertilization[J]. J. Nucl. Agric. Sci., 2009, 23(2): 334-340.

[5] 叶优良, 孙建好, 李隆, 等. 灌水对大麦/玉米带田土壤矿质氮影响的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 107-111.
Ye Y L, Sun J H, Li L *et al*. Effect of irrigation on mineral nitrogen concentration in soils of maize/barley intercropping [J]. J. Soil Water Conserv., 2003, 17(3): 107-111.

[6] 杨蕊菊, 柴守玺, 马忠明, 等. 水肥耦合对小麦玉米带田产量效应及土壤水分动态研究[J]. 核农学报, 2011, 25(5): 1004-1009.
Yang R J, Chai S X, Ma Z M *et al*. Water and fertilizer coupling on soil water dynamics and yield in intercropped wheat and maize [J]. J. Nucl. Agric. Sci., 2011, 25(5): 1004-1009.

[7] 杨荣, 苏永中. 水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、土壤硝态氮和氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1459-1468.
Yang R, Su Y Z. Effects of nitrogen fertilization and irrigation rate on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe River basin [J]. Acta Ecol. Sin., 2009, 29(3): 1459-1468.

[8] 陈新平, 张福锁. 小麦—玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. 230-248.
Chen X P, Zhang F S. Theory and practice of wheat - maize rotation system integrated nutrient management [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006. 230-248.

[9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Analyses for soil agricultural chemistry[M]. Bejing: China Agriculture Press, 2000.

[10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R K. Analytical method for soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[11] 叶优良, 李隆. 水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利 用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 33-39.
Ye Y L, Li L. Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrate nitrogen accumulation and water and nitrogen use efficiency for wheat/maize intercropping [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2009, 25(1): 33-39.

[12] Li L, Sun J H, Zhang F S *et al*. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping II. Recovery or compensation of maize and soybean after wheat harvesting [J]. Field Crops Res. 2001, 71(3): 173 - 181.

[13] 上官周平, 刘文兆, 徐宣斌, 等. 旱作农田冬小麦水肥耦合增产效应[J]. 水土保持研究, 1999, 6(1): 103-106.
Shang guan Z P, Liu W Z, Xu X B *et al*. Interactive effects of water and fertilizer on yield of winter wheat in dryland [J]. Res. Soil Water Conserv., 1999, 6(1): 103-106.

[14] 田昌玉, 左余宝, 赵秉强, 等. 解释与改进差减法氮肥利用率的计算方法[J]. 土壤通报, 2010,41 (5): 1257-1260.
Tian C Y, Zuo Y B, Zhao B Q *et al*. Explain and improve of the subtraction calculating method for apparent recovery efficiency of applied nitrogen [J]. Chin. J. Soil Sci., 2010,41 (5): 1257-1260.

[15] Fang Q X, Yu Q, Wang E L *et al*. Soil nitrate accumulation, leaching and crop nitrogen use as influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. Plant Soil, 2006, 284(4): 335-355.

[16] 徐杰, 陶洪斌, 宋庆芳, 等. 水氮配置对华北冬小麦 - 夏玉米种植体系氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J]. 华北农学报, 2011,26(4): 153-158.
Xu J, Tao H B, Song Q F *et al*. The effect of water-nitrogen regimes on the nitrogen utilization and soil NO_3^--N residue of winter wheat-summer maize system in the north China Plain[J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2011, 26(4): 153-158.

[17] 钟茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 285-293.
Zhong Q, Ju X T, Zhang F S. Analysis of environmental endurance of winter wheat / summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(3): 285-293.

[18] 刘小刚, 张富仓, 田育丰. 交替隔沟灌溉和施氮对玉米根区水氮迁移的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2025-2032.
Liu X G, Zang F C, Tian Y F. Effects of alternative furrow irrigation on transport of water and nitrogen in maize root zone [J]. Sci. Agric. Sin., 2008, 41(7): 2025-2032.

[19] 薛亮, 周春菊, 雷杨莉, 等. 夏玉米交替灌溉施肥的水氮耦合效应研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 91-94.
Xue L, Zhou C J, Lei Y L. *et al*. Effect of water and nitrogen spatial coupling under alternate furrow irrigation and fertilizer placement on summer maize [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2008, 24(3): 91-94.

[20] 郭丽, 张凤路, 贾秀领, 等. 冬小麦-夏玉米复种连作中定位水氮组合对籽粒灌浆特性及产量的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 159-164.
Guo L, Zhang F L, Jia X L *et al*. Effects of water and nitrogen location study on grain filling characteristics and yield of crop rotation and multiple cropping [J]. Acta Agric. Boreali-Sin, 2010, 25(3): 159-164.