

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

刘明^{1,2}, 张忠学^{1,2*}, 郑恩楠^{1,2}, 陈鹏^{1,2}, 陈帅宏^{1,2}, 尚文彬^{1,2}

(1. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要:【目的】提高水氮利用效率、玉米产量和经济效益。【方法】设置3个灌水定额水平(W0:0 mm、W1:40 mm、W2:80 mm), 4个施氮量水平(N0:0 kg/hm²、N1:180 kg/hm²、N2:230 kg/hm²、N3:280 kg/hm²), 分析比较了不同水氮管理模式对拔节期春玉米光合速率、叶片瞬时水分利用效率(WUE)、成熟期地上部分干物质质量、产量、水分利用效率(WUE)、氮素积累量以及对氮素利用的影响。【结果】施氮可以显著提高拔节期光合速率, 当施氮量由230 kg/hm²提高到280 kg/hm², 光合速率的增幅减小。施氮对WUE有促进作用, 而灌水定额在40~80 mm之间时, 增加灌水定额不利于WUE提高。N2W1处理的成熟期地上部分干物质积累量和产量较N0W0处理分别提高54.27%和78.36%。玉米水分利用效率在2.31~3.61 kg/m³之间, 在各施氮水平下WUE表现为W0水平>W1水平>W2水平。灌水施氮处理植株和籽粒的氮素积累量明显高于N0W0处理的, 施氮对成熟期籽粒和植株的氮素累积均有显著影响(P<0.05)。W1水平下植株氮素积累量与W0水平差异显著, 但与W2水平差异不大。W1水平下的籽粒氮素积累量最大, 与W0水平差异显著。氮肥偏生产力随施氮量的升高而减小, 在同一个施氮水平下, 氮肥偏生产力表现为W1水平>W2水平>W0水平。N2W1处理的氮素籽粒生产效率最高, 除N3处理外, 当灌水定额增加时, 氮素籽粒生产效率有所增加, 但增幅变小。【结论】增加施氮量可以提高产量和干物质质量积累, 提升水分利用效率, 而氮素利用效率随着施氮量的增加呈先增加后减小的趋势, 氮肥偏生产力与施氮量负相关。建议当地采取灌水定额40 mm, 施氮量230 kg/hm²的灌水施氮方式。

关键词: 喷灌; 水氮耦合; 光合特性; 产量; 干物质积累; 水氮利用; 玉米

中图分类号:S513

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180197

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.

0 引言

干旱和粗放式的水氮管理是我国东北地区农业生产中存在的主要问题^[1]。而玉米作为东北地区主要的粮食作物, 如何提高玉米产量和水氮利用效率, 达到节水、增产的目的, 成为关注的重点。灌水定额和施氮量是影响玉米产量和品质的主要因素^[2-3]。在农业生产过程中, 增施氮肥和提高灌水定额以获得高产成了常用手段, 结果造成氮肥利用率低和水资源浪费, 同时肥料氮也是农业污染的主要来源^[4]。

相关研究表明, 不同作物需配以合适的水、氮比例, 才能获得较高的产量和较好的品质^[5-8]。中国在从事农业生产过程中氮肥的当季利用率仅为30%~35%^[9], 中国北方某些地区土壤剖面硝态氮的积累对水体环境构成了某种程度的威胁。以水调肥以肥促水是提高氮肥利用效率, 减少损失的重要手段。刘小刚等^[10]研究表明施氮量对玉米全氮积累总量的影响大于灌水定额。刘洋等^[11]建议东北黑土区玉米膜下滴灌采用3次施氮、施氮量150~200 kg/hm²的施氮管理措施。王栋等^[12]研究表明春玉米全生育期喷灌水肥耦合最佳组合为: 磷肥134.4 kg/hm²、氮肥282.5 kg/hm²、灌水定额10.61 mm。杨启良等^[13]研究了沟灌方式和水氮对玉米产量与水分传导的影响, 交替灌溉方式下中水高肥(灌水定额282 mm, 施氮量270 kg/hm²)处理的水分传导最优。

收稿日期:2018-04-03

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD12B01)

作者简介:刘明(1993-), 男。硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术的研究。E-mail: 1412374874@qq.com

通信作者:张忠学(1967-), 男。教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术的研究。E-mail: zhangzhongxue@163.com

尽管在玉米水肥耦合效应方面的研究较多,但多集中于寻求灌水定额和施肥量的最佳组合方式,以达到增产的目的。目前关于东北地区喷灌条件下玉米生长特性和水分、氮素利用效率的研究较少。本试验在前人的研究基础上,以提高玉米水分和氮素利用效率为总体目标,采取喷灌的灌溉方式,研究东北地区春玉米不同灌水定额和施氮量耦合对玉米光合特征、产量和水氮利用效率等的影响,以揭示玉米生长对水氮的响应特征及其内在联系,为寒地黑土区不同水氮管理方式提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017年4—10月在黑龙江省肇州县水利科学试验站内进行。该站地处45°17'N、125°35'E,属大陆性温寒带气候。年降雨量在400~500 mm之间,平均蒸发量1 733 mm,2017年玉米苗期降雨量为69 mm,拔节期降雨量为51 mm,抽雄期降雨量为63 mm,灌浆期降雨量为215 mm,成熟期降雨量为42 mm。大于10℃有效积温2 845℃,无霜期138 d,属于第一积温带,试验土壤为碳酸盐黑钙土。土壤体积质量土层深度在0~10 cm为1.18 g/cm³,10~20 cm为1.22 g/cm³,20~30 cm为1.22 g/cm³,30~40 cm为1.21 g/cm³,40~100 cm为1.01 g/cm³。试验区土壤田间质量持水率为31.78%,土壤pH值为6.4。土壤有机质、全氮、全磷、全钾质量分数、碱解氮、速效磷、速效钾质量分数分别为28.20、1.41、0.88、19.86、0.13、0.04、0.21 g/kg。

1.2 试验设计

试验设置灌水定额和施氮量2个因素。灌水定额设置3个水平:①W0:0 mm,②W1:40 mm,③W2:80 mm。氮肥施用量设置4个水平为:①N0:0 kg/hm²,②N1:180 kg/hm²,③N2:230 kg/hm²,④N3:280 kg/hm²,磷肥和钾肥施用量均为90 kg/hm²。共12个处理,每个处理3次重复,共36个小区,详见表1。各小区面积10.4 m×10 m=104 m²。保苗67 500株/hm²,各小区均采用65 cm小垄种植,每小区16条垄,株距23.0 cm。保护区宽度为5 m,保护行宽度为1 m,隔离带宽度为1.3 m(即2条垄)。试验所用的肥料为尿素(含氮量46%),磷酸二铵(含氮量18%;含磷量46%)和硫酸钾(含钾量58%),施肥方式为撒施,不覆膜。各处理的肥料施用量均是经过折算后的氮、磷、钾元素的施用量,磷肥和钾肥全部做基肥施入,氮肥1/2随底肥施入,剩余1/2在拔节期施入。

表1 田间小区试验处理设置

处理	灌水定额/mm	肥料施用量/(kg·hm ⁻²)		
		N	P	K
N0W0	0	0	90	90
N0W1	40	0	90	90
N0W2	80	0	90	90
N1W0	0	180	90	90
N1W1	40	180	90	90
N1W2	80	180	90	90
N2W0	0	230	90	90
N2W1	40	230	90	90
N2W2	80	230	90	90
N3W0	0	280	90	90
N3W1	40	280	90	90
N3W2	80	280	90	90

供试玉米品种为大龙568。试验于2017年5月1日播种,生育期内灌水2次,分别在拔节期、抽雄期灌水,各次灌水定额比例为1:1,其中拔节期灌水是在施完拔节肥随后进行灌水,6月30日追肥,撒施尿素,拔节期7月1日灌水,抽雄期7月20日灌水。

喷灌采用5983型摇臂式喷头(喷洒半径9.0~14.0 m,流量0.74~1.02 m³/h),喷头安装在长1.5 m的支管上。灌水时将4个喷头分别布置在小区四角上,逐一对各小区进行灌水。为防止各小区之间发生水分交换,调节喷头射程略微小于小区长度。灌溉所用水源为当地地下水,用管道末端的水表控制灌水量。

1.3 观测内容及方法

1.3.1 土壤水分测定

采用土钻取土,用烘干法测定土壤含水率。利用土钻取土,每隔10 d测1次土壤样本,同时播前、收后、各次灌水前后、降雨加测,测取0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm土层含水率。钻土后,要用细土将钻孔回填密实,并做记号。观测日当天取土,每个小区选定3个测点,前后3次取土点的距离宜为100 cm,向下取土时土钻应保持垂直,将取出的土样用铝盒盛装并称其质量,称后送入烘箱,烘土温度要求稳定在100~105℃之间,烘干至质量恒定,取出再称其干质量。玉米各生育期耗水量的计算式为:

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P \quad (1)$$

式中:ET₁₋₂为阶段耗水量(mm);i为土壤层次号数;n为土层总数目;γ_i为第i层土壤干体积质量(g/cm³);H_i为第i层土壤的厚度(cm);W_{i1}为第i层土壤在时段始的质量含水率(%);W_{i2}为第i层土壤在时段末的质量含水率(%);M为时段内的灌水定额(mm);P为时段内的降雨量(mm),试验区地下水埋深较大(超过6 m),且地

势平坦,故不计地下水补给、深层渗漏以及地表径流。不同生育期不同处理的0~100 cm土层土壤贮水量如图1,图1所示土壤贮水量为各生育期初的土壤贮水量,由于灌浆期的降雨量较大,导致成熟期初的土壤贮水量较高。

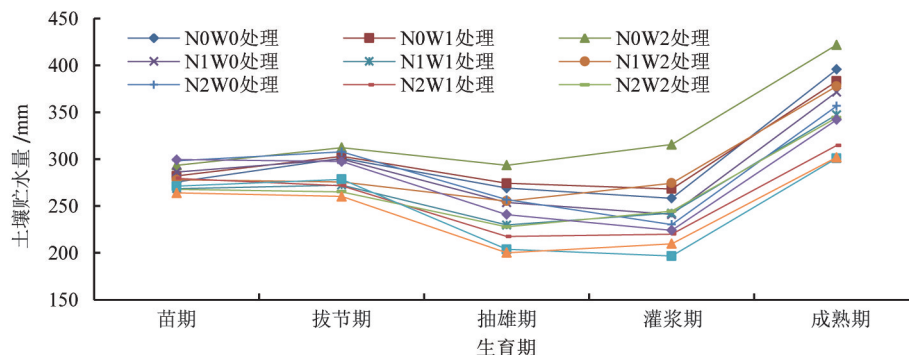


图1 不同生育期0~100 cm土层土壤贮水量

1.3.2 光合指标测定

在拔节期(7月15—17日),无风晴天09:00—11:00,连续3 d,利用美国LI-COR公司生产的LI-6400型光合仪在每个小区随机选择3株玉米,对其从上至下第4片叶进行光合速率测定。测量植株叶片光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)等光合指标。

1.3.3 产量测定

在2017年9月28日进行测产和考种。每个小区随机选取5点(中心点与对角点),每点连续选取1株玉米测其单株穗长、穗粗、穗质量、百粒鲜质量及秃尖长。然后将籽粒放入干燥箱并保持 $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ 干燥8 h,冷却后利用电子天平称其质量,再次放入干燥箱中直至质量恒定,得到玉米百粒干质量。烘干至质量恒定后,采用LDS谷物水分测定仪测定烘干后玉米籽粒含水率,测得不同处理玉米籽粒含水率在16%~20%之间。

1.3.4 植株干物质量及全氮测定

分别在拔节期、抽雄期、灌浆期、成熟期每小区选择5株玉米,将植株沿地上部分取下,用农用压缩喷雾器将植株冲洗干净,并将植株按不同器官放入烘箱中, 105°C 下杀青30 min后, 60°C 烘干至干质量恒定。将烘干后的样品放置在干燥箱中冷却,冷却后称量各生育期干物质量。

将称量后的成熟期样品按不同器官用球磨机磨碎,过80目筛后混匀,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,取消煮后的清液,采用德国SEAL Analytical公司生产的AutoAnalyzer-III型流动分析仪,测定成熟期植株各器官含氮量。

1.3.5 相关指标计算公式

叶片瞬时水分利用效率(WUE_i)计算式为:

$$WUE_i = P_n / T_r, \quad (2)$$

式中: WUE_i 为叶片瞬时水分利用效率($\mu\text{mol}/\text{mmol}$); P_n 为光合速率($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); T_r 为蒸腾速率($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

水分利用效率(WUE)计算式为:

$$WUE = Y / ET, \quad (3)$$

式中: Y 为玉米产量(kg/hm^2); ET 为整个生育期玉米耗水量(m^3/hm^2)。

氮肥偏生产力=籽粒产量/施纯氮量,氮素籽粒生产效率=籽粒产量/植株吸氮量。

1.3.6 数据处理

采用Microsoft Excel 2010记录数据,SPSS16.0统计分析数据,LSD法进行显著性检验。绘图采用Microsoft Excel 2010。

2 结果与分析

2.1 不同水氮管理的玉米拔节期光合特性

拔节期的光合指标如表2所示。从表2可以看出,拔节期光合速率整体变化趋势为随着灌水定额和施氮量的增加而增加,但增幅减小。光合速率受灌水定额和施氮量影响显著($P < 0.05$)。施氮处理光合速率较未施氮处理提高了23.08%~43.22%。但施氮量由 $230 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 提升至 $280 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,光合速率仅提升6.22%,

说明高施氮量对玉米光合作用的提升效果并不显著。

表2 拔节期光合指标

处理	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$G_i/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$T_i/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$WUE/(\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1})$
N0W0	22.13e	0.14d	2.53d	8.75d
N0W1	23.14e	0.17c	2.73c	8.48de
N0W2	24.92d	0.19bc	3.01bc	8.28e
N1W0	26.40c	0.17c	2.65cd	9.96b
N1W1	29.79b	0.19bc	3.10b	9.61c
N1W2	30.20ab	0.20b	3.17b	9.53c
N2W0	28.33bc	0.18bc	2.72c	10.42a
N2W1	32.89a	0.20b	3.21ab	10.25ab
N2W2	33.42a	0.21b	3.33ab	10.04b
N3W0	31.01ab	0.22b	3.06bc	10.13b
N3W1	34.44a	0.26a	3.48a	9.90bc
N3W2	35.08a	0.27a	3.59a	9.77bc

注 表中同列不同字母表示差异达到显著水平($P<0.05$),下同。

灌水定额在W0水平时,N1施氮水平光合速率(P_n)较N0施氮水平增加19.3%,N2较N1施氮水平增加7.3%。灌水定额在W1水平下,N1W1处理 P_n 较N0W1处理增加28.7%,N2W1处理较N1W1处理增加10.4%。灌水定额在W2水平下,N1W2处理 P_n 较N0W2处理提高21.2%,N2W2处理 P_n 较N1W2处理提高10.7%。在不同灌水定额下,N3施氮水平和N2施氮水平处理间无明显差异($P>0.05$)。与N0、N1施氮水平相比,N2施氮水平 P_n 整体提高34.83%和9.55%,N3处理整体提高43.23%和16.37%,N3、N2处理与N1、N0的差异明显($P<0.05$)。施氮灌水处理 P_n 与N0W0处理相比明显上升,水氮耦合效应对于玉米光合速率的影响达到显著水平($P<0.05$)。

施氮处理的 WUE_i 均高于不施氮处理,说明施氮对 WUE_i 有促进作用,其中N2W1处理 WUE_i 最大。在W0水平下,施氮后 WUE_i 明显提高,表明施氮可以补偿由于水分胁迫造成的 WUE_i 的降低,而W2水平下的所有施氮处理的 WUE_i 仍低于W1,说明当灌水定额充足时,增加灌水定额不利于 WUE_i 的提高。N1、N2、N3处理间的 WUE_i 差异不大($P>0.05$),而与N0W0处理差异明显($P<0.05$),灌水和施氮对 WUE_i 的影响明显。

2.2 不同水氮管理的玉米氮素吸收利用

由表3可以看出,灌水施氮处理植株和籽粒的氮素累积量明显高于N0W0处理的。与N0处理相比,施氮的N1、N2、N3处理植株氮素总量平均增加27.93%、37.91%和41.20%,植株的氮素累积量随施氮量的增加而增加。籽粒的氮素累积量平均增加27.95%、44.29%和37.69%,施氮对成熟期籽粒的氮素累积影响显著($P<0.05$),籽粒的氮素累积量随施氮量的增加呈现先增大后减小的变化趋势。与W0相比,W1、W2水平下植株氮素总累积量平均增加10.67%和5.77%,W1水平和W2水平与W0水平差异显著($P<0.05$);W1、W2水平下籽粒的氮素累积量相比W0整体增加9.61%和3.50%,W1与W0差异明显($P<0.05$)。

氮肥偏生产力随着施氮量的增加而减小,且受施氮量的影响差异显著($P<0.05$)。相同施氮量的情况下均表现为W1水平>W2水平>W0水平,N1、N2条件下差异不显著,N2水平下,W1、W2、W0之间差异显著。氮素籽粒生产效率随施氮量的增加呈现先增加而后减小的趋势,随灌水水平的升高而升高,但增幅变小。

表3 氮素累积量和利用率

处理	籽粒氮累积量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	植株氮累积量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	氮肥偏生产力/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	氮素籽粒生产效率/($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
N0W0	154.8f	225.1f	-	37.98c
N0W1	167.33e	240.4e	-	38.16c
N0W2	151.9f	238.4e	-	39.02c
N1W0	192.1d	283.4d	64.66ab	41.08b
N1W1	208.6c	310.8cd	72.29a	41.87b
N1W2	205.8c	306.3cd	72.01a	42.32a
N2W0	218.5bc	308.8cd	54.77c	40.80bc
N2W1	241.5a	345.2a	64.66ab	43.08a
N2W2	223.9b	316.7c	60.08b	43.64a
N3W0	206.5c	329.5b	44.70d	37.98c
N3W1	228.7b	351.8a	47.79d	38.04c
N3W2	217.4bc	331.5b	45.38d	38.33c

2.3 不同水氮管理的玉米产量和干物质累积量

由表4可以看出,所有处理的干物质质量均较N0W0处理明显提高,不同施氮量和灌水定额对植株干物质累积的影响达到显著水平($P<0.05$)。干物质累积最快的阶段是抽雄期至灌浆期。拔节期、抽雄期、灌浆期的干物质累积量规律总体表现为W1水平>W2水平>W0水平,N2水平>N3水平>N1水平>N0水平。所有施氮处理在W2、W1水平下较W0水平的干物质累积量均有明显提高,W2水平较W1水平干物质累积都有所下降,说明水分可以促进植株对氮素的吸收进而促进干物质累积,而过高的水分会降低甚至抑制玉米对氮肥的吸收利用。除N2W1与N3W1处理外,N2W2与N3W2处理表现为干物质随着氮素水平增加而降低,但差异不明显($P>0.05$)外,在各自灌水水平下,其他处理干物质质量均表现为随着施氮量增加而增加,说明适宜的施氮量会促进植株干物质累积。N2W1处理4个时期干物质质量较N0W0处理分别提高81.26%、73.31%、71.10%、54.27%,水氮耦合作用优势明显。

从表5可以看出,N2W1处理的产量最高,为14 872 kg/hm²,N0W0处理的产量最低,为8 548 kg/hm²,各处理较N0W0处理产量显著增加。玉米产量随灌水定额增加呈现先增加后减小的趋势,W1、W2水平下产量较W0水平增加12.09%和8.41%,与W0水平差异显著($P<0.05$),但处理N1W1与N1W2,N3W1与N3W2处理之间的差异不大($P>0.05$),说明在低氮(N1)水平和高氮(N3)水平下,调高灌水定额并不能有效地提高产量,而在适宜的施氮(N2)水平下,N2W1处理的产量却较N2W2处理显著提高,二者之间差异明显($P<0.05$),说明适宜水氮配比较单纯的提高灌水定额和施氮量更有助于产量的提高。同一灌水水平,施氮处理与未施氮处理间产量差异明显($P<0.05$),施氮处理产量均高于未施氮处理的。W0、W1、W2灌水水平下,各处理产量随施氮量增加均表现为先增加而后减小的趋势。

表5 不同生育期耗水量、产量及水分利用效率

处理	耗水量/mm					产量/(kg·hm ²)	水分利用效率/(kg·m ⁻³)
	苗期	拔节期	抽雄期	灌浆期	成熟期		
N0W0	43.9e	82.97e	73.61de	77.69e	35.14e	313.3f	8 548f
N0W1	48.43de	99.9d	88.61b	100.4bc	40.62c	377.9e	9 172e
N0W2	50.31de	110.1c	80.64c	108.9c	57.31a	407.2d	9 300e
N1W0	52.70d	96.30d	73.34d	81.63d	41.36c	348.3ef	11 638d
N1W1	70.37b	113.7c	72.1e	110.3bc	57.61a	422.1cd	13 912bc
N1W2	71.36b	111.6c	83.64bc	111.8bc	60.01a	438.5c	12 961bc
N2W0	59.64cd	102.2d	79.36c	88.61d	42.66c	372.5e	13 297c
N2W1	77.10a	125.5b	80.17c	120.6a	55.74ab	459.2b	14 872a
N2W2	71.69b	128.6b	86.12bc	115.4b	56.97ab	458.8b	13 817b
N3W0	71.36b	107.8cd	79.39c	97.36c	49.36b	405.3d	12 514c
N3W1	61.98c	145.8a	90.00a	111.0bc	57.62a	466.4b	13 381bc
N3W2	72.94b	151.3a	93.11a	123.2a	59.71a	500.3a	12 706bc

2.4 不同水氮管理的玉米耗水和水分利用效率

由表5可以看出,1)在喷灌的条件下玉米各生育期中,拔节期和灌浆期玉米耗水量最大,是玉米需水的关键时期,抽雄期与苗期次之,成熟期耗水量最小。除N2W2和N2W1处理的耗水量相近外,随着灌水定额的增加,玉米全生育期总耗水量成增加趋势,其中W1、W2处理较W0处理提高19.88%和25.38%,随着施氮量的增加,玉米总耗水量成增加趋势。N1、N2、N3施氮水平下整体耗水量分别较N0水平增加10.05%、18.38%和24.89%。其中N3W2、N3W1、N2W2、N2W1处理总耗水量较N0W0处理提升最为明显($P<0.05$),分别提高59.67%、48.84%、46.55%、46.55%,N3W2处理的耗水量较其他3个处理明显提高。

2)玉米水分利用效率的范围在2.28~3.57 kg/m³之间。施氮处理的WUE明显大于未施氮处理的。N0施氮水平下在W1、W2水平下的WUE较W0处理下降幅度最大,分别下降9.52%和16.48%,而N1、N2、N3施氮水平下的降幅均小于N0,是因为增施氮肥可以提高玉米产量进而提高玉米水分利用效率,补偿由于灌水定额提高而造成的WUE的下降,WUE随施氮量的升高呈现先升高而后降低的变化趋势。不同灌水水平下WUE整体表现为W0水平>W1水平>W2水平。同一施氮水平下,W0处理虽然产量低于W1和W2,但灌水

对于玉米耗水量的影响更大,使得高灌水定额成为限制水分利用效率提高的关键因素,表现为施加氮肥后,W0水平的水分利用效率仍优于W1和W2。

持续灌水和增施氮肥虽然可以提高作物耗水量,却造成水分利用效率的下降。N2W0处理的水分利用效率最高,和N2W1处理接近,而N2W1处理的产量却明显高于N2W0处理($P<0.05$),从生产实际出发,为了获得高产和更大的经济效益,中水中氮更适宜当地的农业生产。

2.5 不同水氮管理的玉米经济效益分析

不同处理生产成本和经济效益见表6。N3W2处理的投入最高,高出的投入主要源于肥料费用,而肥料投入的提高是由于氮肥施用量的增加,但产量却并没有相应的提高,导致N3W2处理的经济效益在所有施氮处理中最低。适宜的灌水施氮处理(N2W1)的产量最高,使其收入明显高于其他处理,且经济效益最高。说明对生产实际而言,适当的水肥配比,在稍提高投入的同时,会显著提高产量,进而带来可观的经济效益。因此灌水定额40 mm、施氮量230 kg/hm²更符合当地生产实际。

表6 不同处理玉米生产成本和经济效益														元/hm ²	
处理	成 本													收入	经济效益
	整地	播种	种子	施肥		除草		病虫害防治		水费	喷灌设备	收割	合计		
				化肥	人工费	除草剂	人工费	农药	人工费						
N0W0	180	150	240	1 146	100	100	200	225	280	0	0	850	3 471	8 548	5 077
N0W1	180	150	240	1 146	100	100	200	225	280	128	500	850	4 099	9 173	5 074
N0W2	180	150	240	1 146	100	100	200	225	280	256	500	850	4 227	9 300	5 073
N1W0	180	150	240	2 097	200	100	200	225	280	0	0	850	4 522	11 638	7 116
N1W1	180	150	240	2 097	200	100	200	225	280	128	500	850	5 150	13 912	8 762
N1W2	180	150	240	2 097	200	100	200	225	280	256	500	850	5 278	12 961	7 683
N2W0	180	150	240	3 048	200	100	200	225	280	0	0	850	5 473	13 297	7 824
N2W1	180	150	240	3 048	200	100	200	225	280	128	500	850	6 101	14 872	8 771
N2W2	180	150	240	3 048	200	100	200	225	280	256	500	850	6 229	13 817	7 588
N3W0	180	150	240	4 000	200	100	200	225	280	0	0	850	6 425	12 515	6 089
N3W1	180	150	240	4 000	200	100	200	225	280	128	500	850	7 053	13 382	6 328
N3W2	180	150	240	4 000	200	100	200	225	280	256	500	850	7 181	12 706	5 255

注 喷灌设备一次性投入1 000元,正常情况下喷灌设备使用寿命为2 a,故每年使用成本按500元计。

3 讨 论

玉米光合速率影响因素的由大到小的顺序为:灌水定额、氮肥施用量、钾肥施用量、磷肥施用量^[14]。拔节期是玉米营养生长最旺盛的时期,是提高水分利用效率的关键时期。N3W2处理的*P_n*值最大为35.08 μmol/(m²·s),N2W1处理的*WUE_i*最大为10.42 μmol/mmol。水氮耦合可以调节和改善拔节期玉米光合特征,光合速率随着灌水定额和施氮量的提高而增强,玉米光合速率受水氮耦合影响显著,这与前人研究结果^[16-18]相一致。适宜的灌水定额能够更好地发挥氮肥的优势效应,这可能是因为适量的增施氮肥增加了叶片单位面积叶片叶绿素的相对量(*SPAD*),叶片的光能利用率较高。高施氮量对玉米光合作用的提升效果并不明显,没有发挥出氮肥的优势效应。施氮处理的*WUE_i*值均高于未施氮处理,表明施氮对*WUE_i*有促进作用,但在施氮处理中,同一施氮水平下的各处理*WUE_i*相近。在水分胁迫(W0)条件下,通过施氮可以部分补偿由于水分胁迫造成的*WUE_i*的降低。而段巍巍等^[19]研究表明施氮肥越多,各项光合参数值的增加幅度越大。本试验的研究结果显示,随着施氮量的提高,光合速率增强,但是当施氮量由230 kg/m³增加到280 kg/m³时增幅变小。

作物产量是由生物产量即群体干物质质量所决定的,玉米干物质累积是籽粒产量形成的物质基础,产量随干物质的提高而提高^[20]。不同施氮量和灌水定额对植株干物质累积的影响达到显著水平($P<0.05$)。拔节、抽雄、灌浆期的干物质累积量规律总体表现为W1水平>W2水平>W0水平,N2水平>N3水平>N1水平>N0水平,抽雄至灌浆期是干物质累积的关键时期。张颖^[21]指出抽雄至成熟是干物质累积最快的时期,主要是果穗质量增加,也是产量形成的重要时期。植株干物质和产量的形成密切相关,本试验中玉米成熟期干物质累积量和产量最高的处理均是N2W1处理,分别达到474.5 g/株和14 872.52 kg/hm²,较N0W0处理提高54.26%和73.98%。产量随灌水和施氮量的提高先增大后减小,适宜水氮配比较单纯提高灌水定额和施氮量更有助于产量的提高。有研究认为增加施氮量可以增加叶片叶绿素量,提升叶片的光合速率,使光合生产

能力加强,促进干物质累积,提高产量^[22]。本研究中拔节期高水高氮处理(N3W2)的净光合速率最大,而中氮中水(N2W1)处理的成熟期干物质和产量最高,可能是因为拔节期以后,由于追施氮肥和灌水,适宜水氮配比的优势效应在进入灌浆期后进一步显现。胡昌浩等^[23]指出玉米产量大部分来自于花后期光合产物累积;陆卫平等^[24]也认为玉米产量与花后干物质质量呈正比。增施氮肥可以提高作物耗水量,同时水分利用效率随施氮水平的提高先升高再降低。N3W2处理的耗水量最,高达到500.3 mm,而N2W1处理的WUE最大,为3.61 kg/hm²。提高灌水定额增加了玉米耗水量却减小了水分利用效率,虽然施氮可使水分利用效率得到提升,但高灌水定额才是影响限制水分利用效率提高的关键因素。解婷婷等^[25]研究表明青储玉米水分利用效率随着施氮量的升高而减小,造成试验结论差异的原因可能是其分别在苗期、拔节期、开花期施加氮肥,而且灌水定额也与本试验相差很大。

试验结果显示,植株的氮素累积量随着施氮水平的提高而提高;籽粒的氮素累积量随着施氮水平的上升呈现先增加后减小的趋势,N3W1处理的植株氮素累积量最高为351.8 kg/hm²,较N0W0处理提高56.29%。N2W1处理的籽粒氮素累积量最高,为241.50 kg/hm²,较N0W0处理提高56.00%,较N3W2处理提高11.18%。氮肥偏生产力随着施氮量的增加而减小,而不同灌水定额之间无明显差异,这与文献[26-28]结论相近。试验研究表明,氮素籽粒生产效率随施氮量增加先增加后减小,最大值出现在N2水平下,且N2整体水平下较N0增长8.78%。水氮耦合对玉米产量,光合特征,水分利用效率以及植株和籽粒的氮素累积有着极其重要的影响。王小彬等^[29]也指出水和氮与作物产量在一定范围表现为水氮的协同效应。水分利用效率一般随灌溉水量减少及氮肥用量增加而提高,适量节水和减氮分别有助水分利用效率和氮肥利用效率的改善。

4 结 论

1)本试验中,拔节期 P_n 整体变化趋势为随着灌水定额和施氮量的增加而增加,但增幅减小。拔节期玉米WUE_i在8.73~10.27 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ 之间。在水氮耦合效应中,高灌水定额是影响WUE_i的关键因素,施氮对WUE_i有促进作用。

2)植株的氮素累积量随施氮量的增加而增加,籽粒的氮素累积量随施氮量的增加先增大后减小。氮肥偏生产力随着施氮量的增加而减小,在相同施氮水平下表现为W1水平>W2水平>W0水平。氮素籽粒生产效率随施氮量的增加呈现先增加而后减小的趋势,随灌水水平的升高而升高,但增幅变小。

3)喷灌条件下玉米拔节期和灌浆期是玉米需水的关键时期,玉米全生育期总耗水量随灌水定额、施氮量的增加呈上升趋势。玉米水分利用效率的范围在2.31~3.61 kg/m³之间。WUE随施氮量的升高呈现先升高而后降低的变化趋势,不同灌水水平下WUE整体表现为W0水平>W1水平>W2水平。

4)N2W1处理的产量最高,为14 872 kg/hm²,在一定范围内,增加施氮量和灌水定额能提高玉米产量和成熟期干物质累积量。N2W1处理的产量、籽粒氮素累积量、水分利用效率和氮素利用效率均较高,经济效益可达到8 762元/hm²。无论从产量和水氮利用状况,还是从利益最大化和减少氮肥流失的环保角度考虑,推荐当地玉米生产采用灌水定额40 mm、施氮量230 kg/hm²的水氮配比方式。

参考文献:

- [1] 曲祥民,司振江,李芳花,等.水分亏缺与施氮耦合对玉米生长和产量的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(6):128-129,132.
- [2] 王栋.黑龙江省半干旱区玉米喷灌水肥耦合效应试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.
- [3] 张凌一,李波,魏新光,等.辽宁棕壤土区不同滴灌施氮模式对玉米光合特性、产量及品质的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(3):26-31.
- [4] HOWARTH R W.Coastal nitrogen pollution:a review of sources and trends globally and regionally[J]. Harmful Algae, 2008, 8(1):14-20.
- [5] 胡梦芸,门福圆,张颖君,等.水氮互作对作物生理特性和氮素利用影响的研究进展[J].麦类作物学报,2016,36(3):332-340.
- [6] FU Qiuping,WANG Qianjiu, SHEN Xinlei, et al. Optimizing water and nitrogen inputs for winter wheat cropping system on the Loess Plateau,China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(2):230-242.
- [7] 吴立峰,张富仓,周罕见,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.
- [8] ANONYMOUS. Tropical research & education center institute of food & agricultural sciences university of florida[J]. Design Cost Data, 2013, 57(4):36-37.
- [9] 巨晓棠,张福锁.中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J].生态环境,2003(1):24-28.
- [10] 刘小刚,张富仓,杨启良,等.交替隔沟灌溉条件下玉米群体水氮利用研究[J].农业机械学报,2011,42(5):100-105.
- [11] 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.
- [12] 王栋,张忠学,梁乾平,等.黑龙江省半干旱区玉米喷灌水肥耦合效应试验研究[J].节水灌溉,2016(6):15-18.
- [13] 杨启良,张富仓,刘小刚,等.沟灌方式和水氮对玉米产量与水分传导的影响[J].农业工程学报,2011,27(1):15-21.
- [14] 张忠学,张世伟,郭丹丹,等.玉米不同水肥条件的耦合效应分析与水肥配施方案寻优[J].农业机械学报,2017,48(9):206-214.

- [15] 陈延昭,张正,韩国君,等. 水氮耦合对黑河中游绿洲制种玉米光合特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(2):72-76.
- [16] 张凌一,李波,魏新光,等. 辽宁棕壤土区不同滴灌施氮模式对玉米光合特性、产量及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(3):26-31.
- [17] 李广浩,赵斌,董树亭,等. 控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(9):1 406-1 415.
- [18] 戚迎龙,史海滨,李瑞平,等. 膜下滴灌水氮耦合对玉米光合特性的影响[J]. 节水灌溉, 2017(1):50-52, 58.
- [19] 段巍巍,李慧玲,肖凯,等. 氮肥对玉米穗位叶光合作用及其生理生化特性的影响[J]. 华北农学报, 2007(1):26-29.
- [20] 孙扬,郭占全,吴春胜. 地膜覆盖对玉米产量及干物质特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(6):72-75.
- [21] 张颖. 北方春玉米不同生育期干物质积累与氮、磷、钾含量的变化[J]. 玉米科学, 1996(1):63-65.
- [22] 宋航,杨艳,周卫霞,等. 光、氮及其互作对玉米光合特性与物质生产的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(1):121-126.
- [23] 胡昌浩,董树亭,岳寿松,等. 高产夏玉米群体光合速率与产量关系的研究[J]. 作物学报, 1993(1):63-69.
- [24] 陆卫平,陈国平,郭景伦,等. 不同生态条件下玉米产量源库关系的研究[J]. 作物学报, 1997(6):727-733.
- [25] 解婷婷,苏培玺. 灌溉与施氮量对黑河中游边缘绿洲沙地青贮玉米产量及水氮利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2):72-76.
- [26] 谢英荷,栗丽,洪坚平,等. 施氮与灌水对夏玉米产量和水氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6):1 354-1 361.
- [27] 郭丽,史建硕,王丽英,等. 滴灌水肥一体化下施氮量对夏玉米氮素吸收利用及土壤硝态氮含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5):668-676.
- [28] 李玉斌,马忠明. 水氮互作对膜下滴灌玉米产量及水氮利用的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(2):102-109.
- [29] 王小彬,代快,赵全胜,等. 农田水氮关系及其协同管理[J]. 生态学报, 2010, 30(24):7 001-7 015.

Photosynthesis, Water and Nitrogen Use Efficiency of Maize as Impacted by Different Combinations of Water and Nitrogen Applications

LIU Ming^{1,2}, ZHANG Zhongxue^{1,2*}, ZHENG Ennan^{1,2}, CHEN Peng^{1,2}, CHEN Shuaihong^{1,2}, SHANG Wenbin^{1,2}

(1.School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2.Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: 【Objective】 This paper aimed to find an optimal combination of water and nitrogen application which can simultaneously improve their use efficiency by maize under sprinkler irrigation. **【Method】** The experiment consisted of three irrigation levels : No irrigation (W0); irrigating 40mm (W1) and irrigating 80 mm (W2); and four nitrogen fertilizer applications: No fertilizer (N0), 180 kg/hm² (N1), 230 kg/hm² (N2) and 280 kg/hm² (N3). In each treatment, we measured photosynthetic rate, leaf water use efficiency (*WUE_i*) at jointing stage, above- and below- ground biomass at mature stage, yield, overall water use efficiency (*WUE*) and nitrogen accumulation and nitrogen fertilizer utilization. **【Result】** With increase in nitrogen fertilizer application, the photosynthetic rate at the jointing stage increased but at a decreasing rate. Nitrogen fertilizer application had a positive effect on *WUE_i*, but was less effective when the irrigation amount was between 40 mm and 80mm. Compared with N0+W0, N2+W1 increased the above-ground biomass and yield by 54.27% and 78.36% respectively. The *WUE* varied between 2.31 to 3.61 kg/m³, and under the same nitrogen application, the *WUE* of different irrigations ranked in W0>W1>W2. Irrigation and nitrogen application increased nitrogen accumulation in plants and grains, especially nitrogen application whose impact at the maturity stage was significant (*P*<0.05). Nitrogen accumulation peaked in W1 differing significantly from that in W0, but was statistically the same as that in W2. The partial productivity of nitrogen decreased with the increase in nitrogen fertilizer application. Under the same nitrogen fertilizer application, the partial production of irrigation was ranked in W1>W2>W0. N2+W1 gave the highest NUW in terms of grain output. Except N3, the grain production efficiency of nitrogen increased with irrigation amount despite at a decreasing rate. **【Conclusion】** With nitrogen application increasing, both dry biomass and *WUE* increase but the NUW increases at a decreasing rate. Partial productivity of nitrogen is negatively related to nitrogen application. The experimental results suggest that irrigating 40 mm and applying 230 kg/hm² of nitrogen is an optimal combination under sprinkler irrigation.

Key words: sprinkler irrigation; water and nitrogen coupling; photosynthetic characteristics; yield; dry mass; utilization of water and nitrogen; maize

责任编辑:陆红飞