

水氮协同对玉米光合特性及产量的影响

王科捷¹, 杨乔乔¹, 王佳², 卢圆明¹, 王晓苹¹, 康建宏^{1*}

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 平罗县红果子镇农技站, 宁夏 平罗 753400)

摘 要: 探求引黄灌区在水肥协同条件下影响玉米光合特性及产量构成的机理, 为满足旱区作物优质高产提供理论依据。在 2019—2020 年开展大田试验, 采用 2 因素裂区试验设计, 主区为施氮量, 分别为减氮 30% (N0)、常规施氮 (N1); 副区为滴灌量, 分别为减少滴灌量 30% (W0)、常规滴灌量 (W1) 和增加滴灌量 30% (W2), 分析玉米关键生育时期光合特性和产量。结果表明: 施氮量和滴灌量对叶片叶绿素相对含量 (SPAD)、净光合速率 (P_n)、光系统 II (PS II) 中 P680 反应中心吸收光能的大小 (ABS/RC)、PS II 中最大光化学效率 (F_v/F_m)、捕获光能与热耗散能量的比值 (F_v/F_0)、荧光参数 (PI)、产量和产量构成因素影响显著。2 年最高平均产量为 N0W2 处理。同一施氮量不同滴灌量下叶片 SPAD 值、净光合速率差异显著, 且随着滴灌量的增加而增加, 但 N0W2 与 N1W2 差异不显著。2 年不同水氮处理下叶面积指数 (LAI) 随着生育进程推进呈先增后降趋势, 在抽雄期达到最大值。 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、ABS/RC、PI 随生育期推进呈先增后降趋势, 滴灌量对其影响效应大于施氮量; 各荧光参数在同一施氮量下随着滴灌量的增加而增加, 在滴灌量 W2 下 N0 处理生育后期 F_v/F_m 、ABS/RC、PI 与 N1 处理差异不显著, F_v/F_0 显著低于 N1 处理, 说明适当施氮在保持捕获光能的同时可以增加热耗散, 降低高温对叶片的损害。在宁夏引黄灌区采用水肥一体化模式配合水氮处理 (全生育期施氮量 292 kg/hm^2 和滴灌量 $4290 \text{ m}^3/\text{hm}^2$), 能够提高玉米产量和氮肥利用率, 为当地玉米高产优质高效栽培以及水肥高效利用提供理论支撑和技术指导。

关键词: 玉米; 光合特性; 水肥协同; 产量

玉米是宁夏主要的粮食作物, 占全区种植面积的 40%^[1], 对保障区域和国家粮食安全贡献巨大。在玉米漫灌生产模式中肥大水现象严重, 不仅影响作物生长, 也会降低氮肥利用率, 破坏土壤结构, 污染环境^[2], 加之宁夏北部引黄灌区降水量低及近年来农田灌溉用水限制和非农用水增加等问题, 导致农业用水形势日益严峻, 对玉米稳产增产造成了巨大威胁。滴灌水肥一体化技术可以节约农业用水、提高水分和氮肥利用率, 这对推动当地农业高效绿色发展具有重要意义^[1]。王佳等^[3]研究认为, 施肥量为 270 kg/hm^2 的氮肥通过滴灌带施入田间, 能明显增强光合系统活性、提高净光合速率, 从而增强光合作用。李广浩等^[4]研究表明, 玉米穗位叶的实际光化学效率 ($\Delta F/F_m'$)、叶片光化学猝灭系数以及最大光化学效率的下降速率在水

氮互作下得到了有效的减缓, 并且光能利用率得到提高。王晔等^[5]研究在水肥互作条件下, 节水减氮较传统水肥施用量仍能保持相当的生物量, 其中减少水氮 10% 组合下的产量显著高于农户常规用量下的产量。刘凡等^[6]研究在滴灌条件下, 减氮 25% 和常规施氮较不施水氮相比, 叶面积指数分别显著提高 20.17% 和 11.61%。徐龙龙等^[7]研究表明, 小麦叶片 SPAD 值随着施氮量的减少而呈降低趋势, 但减量施氮 180 kg/hm^2 与传统施氮 225 kg/hm^2 处理间差异并不显著。目前关于水氮协同对水肥利用率、氮素残留和产量影响的研究内容比较多, 但通过高效节水滴灌技术, 探究不同水氮组合对玉米光合特性和产量的影响报道较少。本研究在引黄灌区通过大田试验, 探讨不同水氮组合对玉米光合特性和产量的影响, 从而明晰不同水氮组合的效果, 为宁夏引黄灌区玉米水肥高效利用技术发展提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2019—2020 年在宁夏永宁县望洪镇宁夏农林科学院作物研究所实验基地 ($106^\circ 22'$

收稿日期: 2022-05-31; 录用日期: 2022-09-05

基金项目: 宁夏高质量发展与生态保护科技创新示范项目 (NGSB-2021-3-02); 宁夏自然科学基金 (2021AAC03072); 宁夏区重点研发项目 (2019BBF02003)。

作者简介: 王科捷 (1998-), 硕士研究生, 主要从事作物生态生理研究。E-mail: wkj15648078215@163.com。

通讯作者: 康建宏, E-mail: kangjianhong@163.com。



46.36'' E, 38° 23' 46.31'' N) 进行。平均海拔 1110 m, 年平均降水量 202.2 mm, 全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 3211 $^{\circ}\text{C}$, 年均日照 2897.5 h。试验地 0 ~ 20 cm 土层土壤养分指标及含量见表 1。

表 1 土壤基础肥力水平

年份	pH	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/g)
2019	8.37	16.36	70.54	1.08	42.79	173.23
2020	8.48	17.08	72.72	1.15	43.85	175.44

1.2 供试材料

供试春玉米迪卡 517 为紧凑、抗旱、高产、抗倒伏力强、脱水快、籽粒适宜直收的品种。供试肥料为尿素 (N 46.4%), 为水溶性肥料。

1.3 试验设计

本试验采用 2 因素裂区试验设计, 主区为施氮量, 分别为减氮 30% (N0) 292 kg/hm²、常规施氮 (N1) 417 kg/hm²; 副区滴灌量, 分别为减少滴灌量 30% (W0) 2310 m³/hm²、常规滴灌量 (W1) 3300 m³/hm²、增加滴灌量 30% (W2) 4290 m³/hm², 共 6 个处理, 3 次重复, 合计 18 个小区。每个小区长 10 m, 宽 4.4 m。采用宽窄行种植, 宽行间距 70 cm, 窄行间距 40 cm, 株距 20 cm, 种植密度在 82500 ~ 90000 株/hm²。为避免边际效应, 设置距区组 1.5 m 远、宽 2 m 的保护行, 区组 (重复) 间设 1.5 m 宽铺设主管道, 小区间设 1 m 铺设支管道, 滴灌带连接到支管, 铺设在窄行之间。试验分别于 2019 年 4 月 24 日和 2020 年 4 月 21 日人工精量单粒点播, 9 月 23 日收获。

各处理玉米磷 (P₂O₅)、钾 (K₂O) 肥施用量相同, 分别为 142.5、43.5 kg/hm²。肥料随滴灌施入, 各时期施肥次数和施肥比例为苗期施肥 1 次 (占总施肥量 8%)、拔节期施肥 3 次 (占总施肥量 42%)、抽雄期施肥 1 次 (占总施肥量 15%)、灌浆期施肥 3 次 (占总施肥量 35%); 玉米全生育期共滴水 10 次, 每次滴总滴灌量的 10%, 于播种期滴灌 1 次、苗期滴灌 1 次、拔节期滴灌 3 次、抽雄期滴灌 1 次、灌浆期滴灌 3 次、成熟期滴灌 1 次。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 生理指标

在出苗后 40 d 开始, 每隔 20 d, 在定株玉米中选定 5 株具有代表性的玉米, 选择光照充足的天气于 9:00 ~ 11:00 在田间分别使用 SPAD-

502plus、TPS-2 光合测定仪和 FMS-2 荧光测定仪测定玉米功能叶片 (从玉米基部往上数, 拔节期、大喇叭口期测第 6 片、第 12 片全展叶, 抽雄与灌浆期测定穗位叶) 中部的叶绿素相对含量 (SPAD)、净光合速率 (Pn)、光系统 II (PS II) 中最大光化学效率 (F_v/F_m)、捕获光能与热耗散能量的比值 (F_v/F₀)、PS II 中 P680 反应中心吸收光能的大小 (ABS/RC)、PI (反映荧光参数的综合指标)。

1.4.2 生长指标

在苗期随机选择长势均衡的 5 株玉米进行挂牌定株, 采用长 × 宽 × 系数法 (系数为 0.75), 测定这 5 株玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期每株玉米全展叶叶片面积, 并计算叶面积指数 (LAI)。

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 2007 录入并整理数据, 采用 SPSS 26.0 进行数据统计分析, 方差分析选用最小显著差数法, 显著水平 $\alpha=0.05$, 通过字母标记法表示数据分析结果, 用 Pearson 法进行相关分析, 用 Origin 2021 绘制数据图。

2 结果与分析

2.1 水氮协同对玉米功能叶 SPAD 值和净光合速率的方差分析

两年试验结果方差分析 (表 2) 表明, 氮、水和氮水交互作用对 SPAD 值和 Pn 的影响达显著或极显著水平。水对 SPAD 值、Pn 的影响效应大于氮和水氮交互作用。

表 2 水、氮对玉米 SPAD 值、净光合速率的方差分析

指标	年份	生育期	氮	水	氮 × 水
SPAD 值	2019	拔节期	19.11 [*]	218.25 ^{***}	12.47 ^{**}
		大喇叭口期	34.74 [*]	230.24 ^{***}	6.85 [*]
		抽雄期	21.86 [*]	292.83 ^{***}	6.72 [*]
		灌浆期	68.80 [*]	2694.11 ^{***}	54.51 ^{***}
	2020	拔节期	30.76 [*]	481.55 ^{***}	12.79 ^{**}
		大喇叭口期	18.27 [*]	91.50 ^{***}	7.71 [*]
		抽雄期	97.23 [*]	157.95 ^{***}	4.61 [*]
		灌浆期	18.47 [*]	234.61 ^{***}	17.23 ^{**}
Pn	2019	拔节期	48.78 [*]	125.83 ^{***}	7.74 [*]
		大喇叭口期	925.31 ^{**}	74.64 ^{***}	4.87 [*]
		抽雄期	22.37 [*]	37.77 ^{***}	7.33 [*]
		灌浆期	37.01 [*]	366.84 ^{***}	5.29 [*]
	2020	拔节期	668.94 ^{**}	105.02 ^{***}	5.15 [*]
		大喇叭口期	410.17 ^{**}	95.07 ^{***}	5.92 [*]
		抽雄期			
		灌浆期			

注: NS 表示无显著性差异, * 表示 0.05 水平显著, ** 表示 0.01 水平显著, *** 表示 0.001 水平显著。下同。

2.2 水氮协同对玉米功能叶光合特性的影响

2.2.1 水氮协同对玉米功能叶 SPAD 值的影响

由图 1 可知, 两年玉米功能叶 SPAD 值总体呈拔节期至抽雄期增加, 抽雄期至灌浆期下降趋势, 除 2019、2020 年 N1W0 外, 其他水氮处理 SPAD 值均在抽雄期达最大值; 同一施氮量下玉米功能叶

SPAD 值随着滴灌量的增加而增加; 两年间 N0 的 SPAD 值显著高于 N1, 两年 N0W2 平均 SPAD 值较 N0W1、N0W0 分别高 6.84%、5.55% (抽雄期) 和 5.58%、12.02% (灌浆期)。结果表明, N0W2 提高了玉米抽雄至灌浆期穗位叶 SPAD 值。

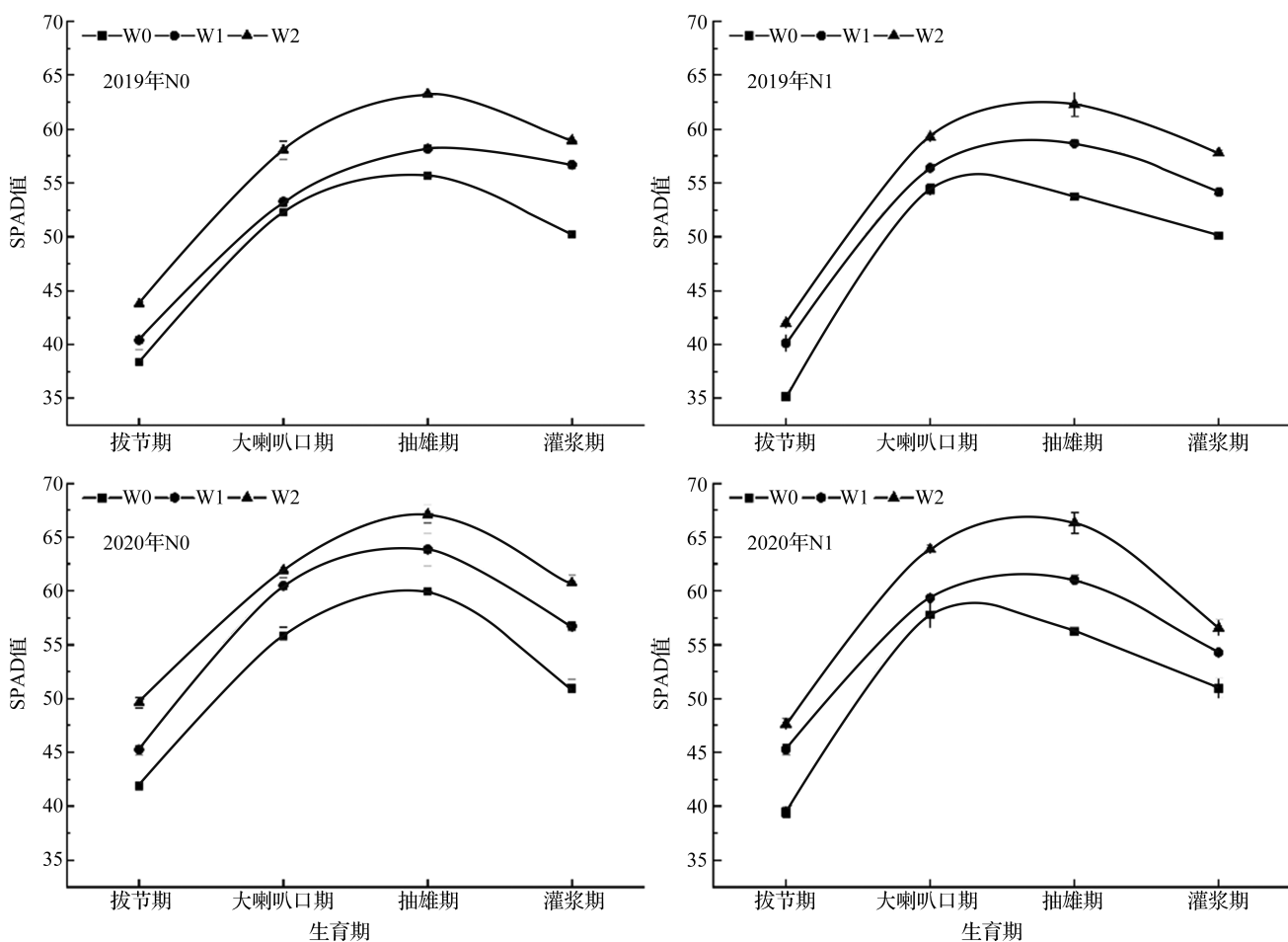


图 1 不同水氮处理对玉米 SPAD 值的影响

2.2.2 水氮协同对玉米功能叶净光合速率的影响

如图 2 所示, 各水氮处理两年 P_n 在抽雄期达最大值, 拔节期至抽雄期呈逐渐降低的趋势。两年 N1 显著低于 N0, 同一施氮量下净光合速率随滴灌量增加而显著增加; 2019 和 2020 年 N0 下 W1 和 W0 较 W2 分别平均显著低 56.27%、61.41%、43.96% 和 26.13%、35.24%、10.44%。结果表明, N0W2 显著提高了玉米功能叶 P_n 。

2.2.3 水氮协同对玉米叶面积指数的影响

如图 3 所示, 在不同滴灌量下, 玉米全生育期 LAI 呈先增后降趋势, 在抽雄期达最大值。2019 年在 N0 下抽雄期和灌浆期 W2 比 W1、W0 分

别高 1.43%、13.85% 和 1.59%、17.41%, N1 下抽雄期至灌浆期各滴灌量下降速率均比 N0 处理下大。在 2020 年抽雄期至灌浆期 N0 下降速率为 $W0 > W1 > W2$, N1 下 W1、W2 下降速率比 N0 小, 但 N0W2 与 N1W2 相近。结果表明, N0W2 能提高玉米生育中后期 LAI。

2.2.4 水氮协同对玉米功能叶荧光参数的影响

如表 3 所示, 两年全生育期玉米功能叶 F_v/F_m 、 F_v/F_0 呈先增后降趋势, 同一施氮量下均随滴灌量增加而增加。两年拔节期各处理平均 F_v/F_m 当中, 同一滴灌量下 N0 与 N1 差异不显著。2019 年抽雄期 N1W2 显著高于 N0W2, 2020 年 N1W2 显著

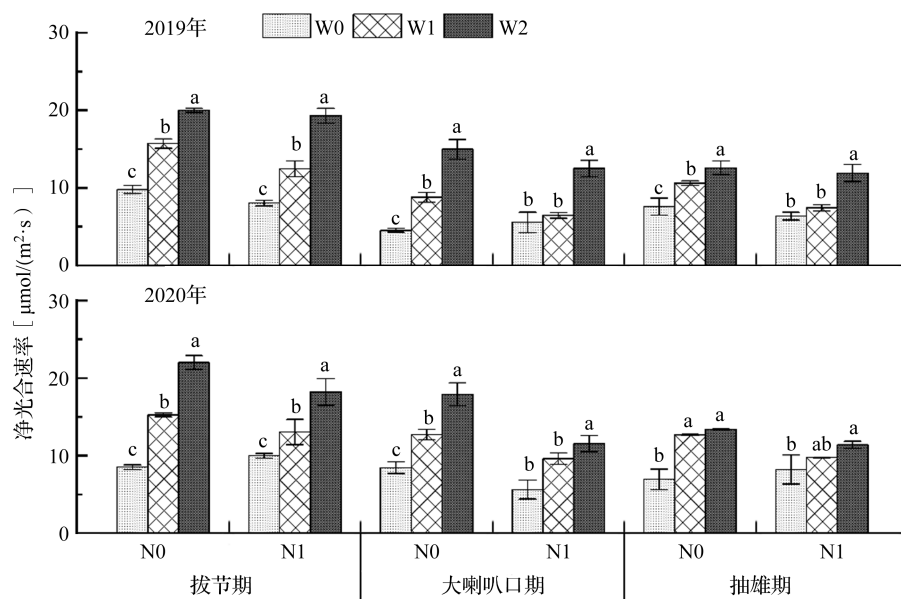


图2 不同水氮处理对玉米净光合速率的影响

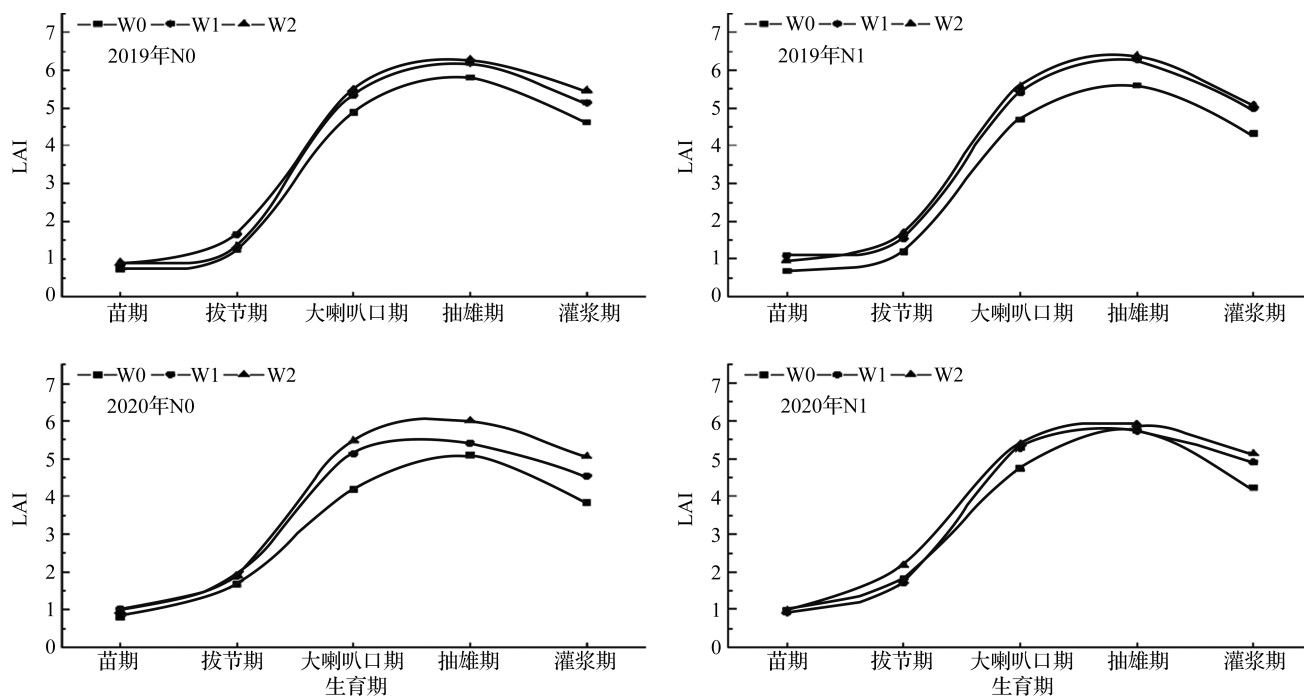
注: 不同小写字母表示同一氮素下处理间差异显著 ($P > 0.05$)。

图3 不同水氮处理对玉米叶面积指数的影响

低于 N0W2。两年大喇叭口期和灌浆期各滴灌量下 N0 下 F_v/F_m 显著高于 N1；两年灌浆期 N0 下 W0 的平均 F_v/F_m 比 W2 显著低 2.84%。

2019 年大喇叭口期至灌浆期 N0W2 的 F_v/F_0 比 N1W2 分别显著低 4.13%、13.11%、5.82%，但 2020 年大喇叭口期至灌浆期 N1W2 却比 N0W2 分别显著低 22.66%、6.85%、23.42%。除 2019 年灌浆

期 N0W1 与 N1W1 下 F_v/F_m 差异不显著，两年 N0 各滴灌量的 F_v/F_m 均显著高于 N1 各滴灌量；两年 W2N0 与 W2N1 的 F_v/F_0 在灌浆期差异显著且结果相反。

两年 W2 的 ABS/RC 显著高于 W0，同一施氮量下 ABS/RC 随滴灌量增加而增加。2019 年抽雄期和灌浆期在 W2 下 N1 比 N0 显著高 19.27% 和 11.45%，2020 年抽雄期和灌浆期在 W2 下 N0 却比

N1 分别显著高 7.98%、32.22%。

滴灌量、施氮量及水氮交互作用对 PI 影响达显著或极显著水平。两年 PI 在拔节期或大喇叭口期出现最大值,大喇叭口期至灌浆期呈逐渐降低趋势,在灌浆期降至最小。两年全生育期在同一施氮量下玉米功能叶片 PI 随滴灌量增加而增加。2020 年拔节期 N1W2 下 PI 显著高于 N0W2,但大喇叭口

期、抽雄期 N0W2 显著高于 N1W2。2020 年灌浆期 N0W2 下 PI 比 N1W2 显著高 24.73%。结果表明,两年减量施氮与常规施氮对 F_v/F_m 、 F_v/F_0 影响表现不一样,虽然 2019 年灌浆期 N0W2 下 F_v/F_0 显著低于 N1W2,但相对于 2020 年同一处理仍能保持较高值;N0W2 较常规施氮可以显著提高灌浆期 F_v/F_m ,增强玉米生育后期光能捕获能力。

表 3 水氮处理对玉米 F_v/F_m 、 F_v/F_0 、ABS/RC、PI 的影响

生育时期	氮 (N)	水 (W)	2019 年				2020 年			
			F_v/F_m	F_v/F_0	ABS/RC	PI	F_v/F_m	F_v/F_0	ABS/RC	PI
拔节期	N0	W0	0.712b	3.402c	2.765b	7.870c	0.739c	2.893b	2.149c	6.626c
		W1	0.767a	3.874b	3.447a	10.431b	0.771b	3.251a	2.803b	7.539b
		W2	0.771a	4.076a	3.492a	10.984a	0.790a	3.332a	2.987a	8.592a
	N1	W0	0.778b	3.520b	2.700c	7.270c	0.746c	2.979c	2.462c	6.564c
		W1	0.806a	4.081a	3.525b	11.173b	0.759b	3.217b	3.017b	6.747b
		W2	0.808a	4.154a	3.821a	12.029a	0.768a	3.779a	3.206a	9.909a
大喇叭口期	N0	W0	0.808b	4.058c	2.705c	10.006b	0.760c	3.569c	3.495c	8.417c
		W1	0.814a	4.182b	3.406b	10.265b	0.782b	3.609b	3.673b	10.791b
		W2	0.821a	4.219a	3.577a	12.087a	0.823a	4.822a	4.136a	12.597a
	N1	W0	0.782b	3.705c	3.038c	7.919c	0.755c	3.247c	3.642b	8.987b
		W1	0.809a	4.285b	3.132b	10.924b	0.773b	3.478b	3.673ab	9.117b
		W2	0.812a	4.401a	3.581a	11.902a	0.787a	3.729a	3.755a	10.451a
抽雄期	N0	W0	0.756b	3.158c	2.374c	6.108c	0.785b	3.956c	2.911c	7.369c
		W1	0.774a	3.358b	2.402b	6.258b	0.787a	4.141b	3.087b	8.328b
		W2	0.781a	3.501a	2.823a	7.403a	0.811a	4.389a	3.542a	11.548a
	N1	W0	0.722c	2.678c	2.124c	4.894c	0.784b	3.997b	3.184b	7.513c
		W1	0.744b	3.088b	2.303b	5.382b	0.800a	4.077a	3.276a	9.616b
		W2	0.801a	4.029a	3.367a	10.588a	0.802a	4.088a	3.280a	11.193a
灌浆期	N0	W0	0.775b	3.121b	1.943c	4.576c	0.697b	2.666c	1.613c	3.981c
		W1	0.777b	3.477a	2.014b	4.803b	0.710a	2.775b	1.779b	4.357b
		W2	0.794a	3.507a	2.113a	6.126a	0.721a	3.270a	2.146a	5.502a
	N1	W0	0.739b	3.512b	1.978c	4.832b	0.669b	2.004c	0.946b	3.834c
		W1	0.778a	3.553b	2.008b	4.931ab	0.684a	2.286b	1.611a	4.162b
		W2	0.779a	3.724a	2.355a	5.042a	0.699a	2.504a	1.623a	4.411a
方差分析	拔节期	N	46.77 [*]	27.58 [*]	73.21 [*]	87.70 [*]	158.90 ^{**}	380.02 ^{**}	715.38 ^{**}	34.16 [*]
		W	21.76 ^{***}	443.98 ^{***}	910.30 ^{***}	2811.20 ^{***}	100.96 ^{***}	51.55 ^{***}	1467.06 ^{***}	1616.74 ^{***}
		N × W	2.36 ^{NS}	4.05 ^{NS}	37.52 ^{***}	122.36 ^{***}	15.42 ^{**}	8.41 [*]	6.73 [*]	235.88 ^{***}
	大喇叭口期	N	61.54 [*]	5.89 ^{NS}	1.45 ^{NS}	19.19 [*]	55.79 [*]	920.13 ^{**}	147.35 ^{**}	247.60 ^{**}
		W	34.26 ^{***}	4227.40 ^{***}	1384.96 ^{***}	288.93 ^{***}	210.34 ^{***}	4328.93 ^{***}	121.19 ^{***}	775.28 ^{***}
		N × W	8.18 [*]	1683.80 ^{***}	254.29 ^{***}	62.04 ^{***}	26.63 ^{***}	1289.71 ^{***}	59.49 ^{***}	204.11 ^{***}
	抽雄期	N	92.93 [*]	22.55 [*]	18.48 ^{NS}	163.49 ^{**}	0.77 ^{NS}	36.12 [*]	20.79 [*]	504.75 ^{**}
		W	122.49 ^{***}	1056.4 ^{***}	3325.99 ^{***}	7359.43 ^{***}	89.69 ^{***}	163.10 ^{***}	116.86 ^{***}	3528.04 ^{***}
		N × W	39.95 ^{***}	406.11 ^{***}	693.94 ^{***}	2951.70 ^{***}	21.45 ^{***}	72.80 ^{***}	71.46 ^{***}	159.45 ^{***}
	灌浆期	N	18.37 ^{NS}	174.36 ^{**}	19.89 [*]	728.51 ^{**}	204.53 ^{**}	12816.17 ^{***}	1587.30 ^{***}	136.61 ^{**}
		W	59.53 ^{***}	54.25 ^{***}	667.58 ^{***}	217.92 ^{***}	15.56 ^{**}	10268.71 ^{***}	1134.85 ^{***}	213.41 ^{***}
		N × W	21.84 ^{***}	14.49 ^{**}	139.65 ^{***}	136.10 ^{***}	0.25 ^{NS}	638.95 ^{***}	195.18 ^{***}	52.86 ^{***}

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。



2.3 水氮协同对玉米产量及其构成因素的影响

2.3.1 水氮配施对玉米产量及其构成因素的影响

由表 4 可知, 两年施氮量、滴灌量及水氮交互对产量及产量构成因素影响达显著水平。2019 年处理间穗重、穗粒重、产量在 N1W1 下达最大值, 百粒重在 NOW2 下最大; 2020 年处理间穗重、穗

粒重、产量在 NOW2 下达最大值, 百粒重在 NOW1 下最大。两年平均产量均为 NOW2 最大, 2019 年 NOW2 与 N1W2 产量差异不显著, 2020 年 NOW2 较 N1W2 显著高 6.35 %; 2019 和 2020 年 N0 下 W2 比 W1、W0 分别显著高 1.85 %、1.38 % 和 3.26 %、14.84 %。结果表明, NOW2 提高了产量。

表 4 水氮处理对玉米产量及产量构成因素的影响

处理		2019 年				2020 年			
		穗重 (g)	穗粒重 (g)	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	穗重 (g)	穗粒重 (g)	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
N0	W0	261.11a	229.30b	37.17b	17997.75b	244.90c	202.30c	37.23c	15878.17c
	W1	259.18a	228.25b	36.76c	17915.02b	270.19b	224.98b	38.81a	17658.03b
	W2	258.95a	232.46a	38.98a	18245.59a	285.06a	232.32a	37.89b	18234.34a
N1	W0	264.25b	232.34b	38.05b	18236.35b	265.74a	212.28b	39.24a	16661.46c
	W1	270.01a	237.40a	38.51a	18632.88a	213.89c	175.79c	37.04c	13797.73b
	W2	259.33c	230.97b	37.57c	18128.30b	243.01b	218.46a	38.15b	17146.26a
方差分析	N	66.78 [*]	366.51 ^{**}	47.15 [*]	47.20 [*]	1410.85 ^{***}	370.06 ^{**}	30.67 [*]	3918.34 ^{***}
	W	10.35 ^{**}	6.71 [*]	46.41 ^{***}	4.75 [*]	160.19 ^{***}	134.96 ^{***}	8.43 [*]	816.12 ^{***}
	N × W	9.91 ^{**}	47.57 ^{***}	218.95 ^{***}	34.11 ^{***}	549.95 ^{***}	179.31 ^{***}	303.24 ^{***}	1084.26 ^{***}

2.3.2 玉米产量与光合、荧光指标的相关性

相关分析 (表 5) 表明, 玉米产量与 SPAD 值、Pn、Fv/Fm、Fv/F₀、ABS/RC、PI 均有不同程度的正相关关系, 说明对增产起促进作用; 2019 年产量与 Fv/Fm 呈显著正相关, 2020 年产量与 Pn 呈显著正相关, 调节 Pn 和 Fv/Fm 进一步提高与产量的相关性, 进而可以促进增产。

表 5 玉米产量与光合、荧光指标之间的相关性

年份	SPAD 值	Pn	Fv/Fm	Fv/F ₀	RC/ABS	PI
2019	0.021	0.047	0.573 [*]	0.450	0.377	0.371
2020	0.351	0.549 [*]	0.388	0.056	0.085	0.071

3 讨论

3.1 水氮协同对玉米 SPAD 值及净光合速率的影响

氮是叶绿素和 Rubisco 的组成元素^[8], 而田间施氮量过低, 会阻碍玉米叶片生长发育和光合同化物的生产与积累。有研究表明玉米在受到水涝胁迫后, 穗位叶 SPAD 值下降, 而随着施氮量的增加逐渐提高^[9], 在干旱^[8]胁迫下穗位叶 SPAD 值也会下降, 而随着滴灌量、施氮量的增加逐渐提高, 但干旱胁迫下高氮处理较低氮处理的 SPAD 值下降幅

度大, 复水后氮水平下 SPAD 值显著上升, 但高氮仍小于低氮处理。本试验在常规施氮量下 SPAD 值没有显著提高, 甚至在灌浆期 W2 下 N1 较 N0 显著降低, 这可能因为过量施氮造成叶片早衰而引起 SPAD 值下降, 这与前人研究结果相似^[8], 而本研究在减量施氮和适量增水条件下, 提高了玉米全生育期功能叶 SPAD 值, 延长了叶片功能持续时间^[10]。

在光合作用过程中, 缺水会致使原初反应的电子供应量减少、气孔的二氧化碳吸收量降低, 最终导致光合速率下降。而缺氮也会降低作物光合速率, 但在干旱处理下, 高、中、低氮各处理玉米穗位叶净光合速率较低, 且处理间差异不显著, 这是由于根外渗透势过低, 致使根系吸收矿质元素受阻, 从而难以提高光合效率^[4], 而魏廷邦等^[11]研究表明, 在灌水量 4050 m³/hm² 下光合速率随着氮素增多而升高, 这说明在灌水的基础上配合适宜施氮量才能提高光合速率。本试验结果表明, 同一施氮量下净光合速率随着滴灌量增加而提高, 这与李广浩等^[4]的研究结果一致。在水氮互作条件下, 灌水量对玉米光合特性的影响程度大于施氮量, 这与李广浩等^[4]、魏廷邦等^[11]、刘明等^[12]研究结果一致。本试验通过减氮增水配合水肥一体模式提

高了氮肥利用率,并显著提高了各时期玉米功能叶片净光合速率^[13],为玉米光合同化积累奠定了基础。

3.2 水氮配施对春玉米叶面积指数、叶绿素荧光参数的影响

作物产量物质基础的90%来源于光合作用^[14],适当地增加叶面积能增强光合作用,促进光合同化物的生产。研究表明干旱会抑制玉米叶片生长,减少叶面积指数^[15],恢复灌水或增施氮肥能缓解干旱对玉米叶片的胁迫作用;水氮耦合能有效减缓叶面积下降速率,且叶面积指数随施氮量和灌水量的增加而增加^[16]。两年试验结果表明,在常规施氮量W2下,抽雄期至灌浆期,叶面积指数下降速率加快,而在减氮条件下,增加滴灌量能增大玉米的叶面积指数,降低生育后期叶面积指数下降速率,减缓叶片衰老进程。

ABS/RC、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和PI是几个重要的叶绿素荧光参数,参数值的大小反映了叶片光合能力的强弱^[17]。刘佳等^[18]、姚春霞等^[19]、于文颖等^[20]研究表明,不同生育时期的玉米在受到干旱胁迫后,其功能叶片的光合作用变弱,PS II活力降低,同时 F_v/F_m 、量子产量、光化学猝灭系数(qP)都有不同程度的下降,非光化学猝灭系数(qN)升高,本试验发现各年限各生育时期荧光参数在同一施氮量下随滴灌量减少而呈不同程度的降低,这与前人研究结果相似。有研究表明,干旱高氮处理较干旱低氮处理的 F_v/F_m 下降幅度更大,且复水后高、低氮下的 F_v/F_m 都上升,但低氮处理大于高氮处理^[21];王佳等^[3]研究表明,在0~270 kg/hm²施氮量内,生育期内玉米ABS/RC、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和PI随着施氮量的增加而上升,而在360和450 kg/hm²氮处理下,各参数值较270 kg/hm²却有不同程度的下降;结果表明过量施氮会降低荧光参数值,抑制光化学反应,而王建程等^[22]研究发现,适当施氮有助于缓解缺水逆境对反应中心的损害,提高玉米 F_v/F_m 和 qP ,在减缓叶片高温伤害的同时显著降低 qN ,提高了光能利用效率。本试验减量施氮与常规施氮处理间参数值差异表现不规律,两年综合以NOW2组合表现较好,两年全生育期NOW2各参数值保持较高值,对于作物发育可满足光合需求。

3.3 水氮配施对春玉米产量的影响

氮是玉米体内许多重要物质的组成元素,玉米对氮肥需求量较高且对氮肥作用后的表现非常强烈^[9];增施氮肥能够改善叶片外形和增强叶片功

能,提升干物质积累量和产量^[23]。本研究结果表明施氮量294 kg/hm²,在常规滴灌量基础上增加30%滴灌量,在改善光合性能的同时提高了产量,这与前人研究结果相近^[3]。本研究还发现,在高氮下随着灌水量增加,产量变化不规律,2020年N1W1较NOW2产量显著下降,N1W2低于NOW2且差异不显著,说明在供水充足条件下增施氮肥,产量没有得到提升还会增加减产的风险,其原因可能是过量施氮致使植株前期营养体过度生长、叶片衰老加快和光合作用减弱^[2],导致生育后期生殖生长期干物质转运率降低,从而减产^[24],这与张建军等^[23]研究结果相似。

4 结论

减氮(292 kg/hm²)、增水(4290 m³/hm²)配合水肥一体化模式能提高玉米产量、SPAD值,减缓叶面积下降速率,保持高水平净光合速率,稳定叶绿素荧光参数。

参考文献:

- [1] 刘学军,翟汝伟,李真朴,等.宁夏扬黄灌区玉米滴灌水肥一体化灌溉施肥制度试验研究[J].中国农村水利水电,2018(9):74-78.
- [2] 王旭敏,锥文鹤,刘朋召,等.节水减氮对夏玉米干物质和氮素积累转运及产量的调控效应[J].中国农业科学,2021,54(15):3183-3197.
- [3] 王佳,慕瑞瑞,贾彪,等.滴灌水肥一体化不同施氮量对玉米光合特性及产量的影响[J].西南农业学报,2021,34(3):558-565.
- [4] 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):1406-1415.
- [5] 王晔,石雅琪,刘呈,等.水氮互作对青贮玉米产量和青贮品质的影响[J].草业科学,2021,38(11):2247-2254.
- [6] 刘凡,刘斌祥,刘佳媛,等.水氮互作对川中丘陵区玉米水肥利用效率和产量形成的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(6):200-206.
- [7] 徐龙龙,殷文,胡发龙,等.水氮减量对地膜玉米免耕轮作小麦主要光合生理参数的影响[J].作物学报,2022,48(2):437-447.
- [8] 杨宇,李霞,潘晨,等.水氮互作对玉米生长和产量影响的研究进展[J].节水灌溉,2021(5):41-45.
- [9] 潘晨,吴倩,杨宇,等.拔节期淹水条件下施氮量对玉米干物质积累和氮素吸收利用的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(2):68-74.
- [10] 刘卫星,王晨阳,冯伟,等.灌水与施氮对夏玉米冠层结构及产量的影响[J].玉米科学,2014,22(5):120-126.



- [11] 魏廷邦, 柴强, 王伟民, 等. 水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(3): 428-444.
- [12] 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.
- [13] 韩祥飞, 刘鹏, 马云国, 等. 不同施氮方式对夏玉米产量、氮素吸收与利用的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(3): 140-147.
- [14] 陈国平. 玉米的干物质生产与分配[J]. 玉米科学, 1994(1): 48-53.
- [15] 孙云云, 刘方明, 高玉山, 等. 吉林西部膜下滴灌水氮调控对玉米生长及水肥利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 76-82.
- [16] 孟晓琛, 张富仓, 刘蓝骄, 等. 播期和水氮互作对滴灌施肥春玉米生长和水氮利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(10): 1794-1804.
- [17] 坚天才, 吴宏亮, 康建宏, 等. 氮素缓解春小麦花后高温早衰的荧光特性研究[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3355-3368.
- [18] 刘佳, 杨永红, 郝引川, 等. 干旱胁迫和复水处理对玉米叶片光合电子传递特性的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(10): 1877-1884.
- [19] 姚春霞, 张岁岐, 燕晓娟. 干旱及复水对玉米叶片光合特性的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 278-283.
- [20] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 干旱胁迫对玉米叶片光响应及叶绿素荧光特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 82-87.
- [21] 熊炳霖, 王仕稳, 王鑫月, 等. 干旱胁迫下氮肥对玉米叶片衰老影响及与碳氮平衡的关系[J]. 玉米科学, 2016, 24(3): 138-146.
- [22] 王建程, 严昌荣, 卜玉山. 不同水分与养分水平对玉米叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业气象, 2005(2): 95-98.
- [23] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 覆膜时期和施氮量对陇东旱塬玉米产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(3): 479-490.
- [24] 蔡晓, 王东, 吴祥运, 等. 氮肥减施对夏玉米生长及水氮利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(1): 158-165.

Synergistic effects of water and nitrogen on photosynthetic characteristics and yield of maize

WANG Ke-jie¹, YANG Qiao-qiao¹, WANG Jia², LU Yuan-ming¹, WANG Xiao-ping¹, KANG Jian-hong^{1*} (1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan Ningxia 750021; 2. Agricultural Technology Station of Hongguozi Town, Pingluo Ningxia 753400)

Abstract: To explore the mechanism of maize photosynthetic characteristics and yield composition under the synergistic conditions of water and fertilizer in the Yellow River irrigation area, so as to provide a theoretical basis for meeting the high quality and yield of crops in arid areas. The field experiment was carried out from 2019 to 2020, and a two-factor split plot experimental design was adopted. The main plot was nitrogen application rate, which was 30% nitrogen reduction (N0) and conventional nitrogen application (N1), and the secondary plot was drip irrigation amount, which was 30% drip irrigation reduction (W0), conventional water drop (W1) and 30% drip irrigation increase (W2), respectively. The photosynthetic characteristics and yield of maize in key growth period were analysed. The results showed that nitrogen application rate and drip irrigation rate had significant effects on leaf SPAD value, net photosynthetic rate, ABS/RC, F_v/F_m , F_v/F_0 , PI, yield and yield components. The highest average yield in 2 years was N0W2 treatment. Under the same nitrogen application rate and different drip irrigation rate, the SPAD value and net photosynthetic rate of leaves were significantly different, and increased with the increase of drip irrigation amount, but N0W2 and N1W2 had no significant difference. Under different water and nitrogen treatments for two years, LAI increased first and then decreased with the progress of growth, and reached the maximum value at tasseling stage. F_v/F_m , F_v/F_0 , ABS/RC and PI increased first and then decreased with the growth period, and the effect of drip irrigation was greater than that of nitrogen application. Under the same nitrogen application rate, the fluorescence parameters increased with the increase of drip irrigation rate. Under the drip irrigation rate of W2, there was no significant difference in F_v/F_m , ABS/RC, PI between N0 treatment and N1 treatment in the late growth stage, and F_v/F_0 was significantly lower than that of N1 treatment, indicating that appropriate nitrogen application could increase heat dissipation and reduce the damage of high temperature to leaves while maintaining the captured light energy. The integrated mode of water and fertilizer combined with water and nitrogen treatments (nitrogen application rate of 292 kg/hm² and irrigation amount of 4290 m³/hm² in the whole growth period) in Ningxia Yellow River irrigation area can improve maize yield and nitrogen utilization rate, and provide theoretical support and technical guidance for local maize high-yield, high-quality and efficient cultivation and efficient utilization of water and fertilizer.

Key words: corn; photosynthetic characteristics; synergism of water and fertilizer; production