

不同时期水氮处理对滴灌冬小麦旗叶光合特性、 保护酶活性及产量的影响

赵金科, 徐学欣, 曲文凯, 刘 帅, 徐宇凡, 孟繁港, 贾 靖, 赵长星*
(青岛农业大学 农学院/山东省旱作农业技术重点实验室, 山东 青岛 266109)

摘 要:【目的】探究华北地区的高效水氮管理模式, 明确按需滴灌条件下水氮耦合对冬小麦旗叶光合特性、衰老特性及产量的影响。【方法】以济麦 22 为供试材料, 在滴灌条件下设置了 N1 (180 kg/hm²) 和 N2 (210 kg/hm²) 2 个施氮梯度, S2 (拔节期和开花期) 和 S3 (拔节期、开花期和灌浆期) 2 种按需滴灌时期的组合处理, 以传统灌溉施肥方式 (施氮量 240 kg/hm², 播前底施 90 kg/hm², 拔节期追施 150 kg/hm² 后畦灌) 为对照 (CK), 于 2019—2021 年冬小麦生长季开展大田试验, 研究了按需滴灌条件下不同时期水氮处理对冬小麦旗叶光合及衰老特性、产量形成及水氮利用的影响。【结果】与 CK 相比, 随着灌水频次的增加, 冬小麦群体叶面积指数 (LAI)、旗叶的 SPAD 值、净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (T_r) 随之增加; 丙二醛 (MDA) 量随灌水次数的增加而降低, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性随之增强; 籽粒灌浆速率随灌溉频次的增加显著提升。施氮量由 180 kg/hm² 增加至 210 kg/hm², 各生理指标无显著变化。在按需滴灌条件下, N1S3 处理 (施氮量 180 kg/hm², 拔节、开花期和灌浆期 3 次灌溉) 有效延缓了冬小麦开花中后期叶片衰老和光合性能的下降, 提高了籽粒灌浆速率。与传统灌溉施肥方式相比, N1S3 处理的千粒质量平均提高了 5.3%, 产量平均提高了 6.2%, 氮肥偏生产力 (PPFn) 及灌溉水利用效率 (IUE) 分别平均提高了 42.1% 和 44.8%。【结论】综合考虑作物生长性状、产量及水肥利用效率, N1S3 处理是最佳的水肥管理模式, 可作为华北平原东部地区滴灌节水节氮的高产灌溉施肥模式。

关键词: 滴灌水肥一体化; 冬小麦; 光合特性; 衰老特性; 产量

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022092

OSID:



赵金科, 徐学欣, 曲文凯, 等. 不同时期水氮处理对滴灌冬小麦旗叶光合特性、保护酶活性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 43-51.

ZHAO Jinke, XU Xuexin, QU Wenkai, et al. The Effects of Different Irrigation and Nitrogen Fertilization on Photosynthesis, Protective Enzyme Activity of Flag Leaf and Yield of Drip-irrigated Winter Wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 43-51.

0 引 言

【研究意义】华北地区的冬小麦产量占全国 70% 以上^[1], 但冬小麦生长季的降水量仅占需水量的 25%~40%, 因此冬小麦的可持续生产高度依赖于灌溉^[2]。目前, 不科学的水肥管理措施虽然短时期内获得了较高产量, 但水肥利用效率低下, 此外造成氮素流失污染地下水, 威胁农田生态环境及地下水安全^[3]。研究发现, 与传统的畦灌、漫灌等灌溉方式相比, 滴灌水肥一体化技术可实现冬小麦节水节肥的目标, 适用于华北平原东部地区冬小麦的生产实践^[4]。因此, 深入探究科学的水肥协调投入及冬小麦产量和资源

利用效率, 是保障冬小麦可持续生产及国家粮食安全的重大战略课题^[5]。

【研究进展】水、氮可通过调控冬小麦旗叶的光合作用影响籽粒产量^[6]。充分灌溉下, 冬小麦旗叶光合速率随灌溉量的增加而提高, 超过一定灌溉量则降低; 而轻度亏缺灌溉下, 冬小麦旗叶光合速率变化不显著^[7-8]。相同施氮量下, 较畦灌减少 30% 灌水量条件下, 滴灌处理的净光合速率仍显著高于畦灌^[9]。除灌水量外, 灌水频次同样对冬小麦生长影响显著, 增加灌水频次可显著提升旗叶超氧化物歧化酶 (SOD) 活性, 降低丙二醛 (MDA) 量, 延缓冬小麦膜的过氧化作用, 延长旗叶功能期; 越冬水可促进冬小麦生育前期的形态构成, 拔节期不宜亏缺灌溉, 孕穗水有利于提高千粒质量^[10-11]。另外, 氮肥只有在水的协同作用下才能发挥其效应, 水分供应不足时, 不同施氮量下的作物产量差异并不显著^[12]。研究表明, 滴灌水肥一体化技术可实现水肥协同管理; 与畦灌相比, 滴灌水肥一体化处理在减少 40% 灌水量的情况下增

收稿日期: 2022-02-23

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目 (2019JZZY010716); 山东省新旧动能转换重大产业公共项目 (2021-54); 青岛市现代农业产业技术体系小麦创新推广团队项目 (6622316104); 国家重点研发计划项目 (2018YFD0300604)

作者简介: 赵金科 (1995-), 男。硕士研究生, 主要从事小麦节水高产栽培生理研究。E-mail: 2732324768@qq.com

通信作者: 赵长星 (1976-), 男。教授, 博士, 主要从事小麦节水高产栽培生理生态研究。E-mail: zhaochangxing@126.com

产了 3.7%，同时减少了 7.7% 的 N_2O 排放量^[13]，其产量及灌溉水利用效率较畦灌分别提高了 14.3%~19.0% 和 1.9%~2.8%^[14]。

【切入点】前人研究已证实，在冬小麦开花后分批次测墒补灌和追肥可在提高灌水效率及氮肥偏生产力的同时获得高产^[15]。但以往研究大多是在喷灌条件下进行，灌水量较多，蒸散量较大，且研究地区及灌溉制度均有较大差异。【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究拟在华北平原东部地区，在滴灌条件下开展分批次的测墒滴灌追肥试验，研究测墒滴灌条件下不同水氮处理对冬小麦旗叶光合特性、衰老特性及产量的影响，以期为冬小麦节水减氮的高产栽培管理模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2019—2021 年在青岛农业大学胶州现代产业园内开展，该地区属于半湿润季风气候区，土壤类型为砂姜黑土。播种前 0~20 cm 土壤有机质、速效磷、速效钾、碱解氮量及土壤 pH 值见表 1。2019—2020 年和 2020—2021 年冬小麦生育期内的有效降水量分别为 269.03 mm 和 226.7 mm。

表 1 试验田播前 0~20 cm 土层基本理化性质

生长季	有机质/($g\ kg^{-1}$)	pH 值	碱解氮/($mg\ kg^{-1}$)	速效磷/($mg\ kg^{-1}$)	速效钾/($mg\ kg^{-1}$)
2019—2020 年	17.33	7.83	125.40	17.13	135.02
2020—2021 年	17.12	7.62	118.31	16.84	133.03

1.2 试验设计

供试冬小麦品种为“济麦 22”，滴灌条件下设置 180 kg/hm^2 (N1)、210 kg/hm^2 (N2) 2 种施氮梯度；2 种灌溉施肥时期方案：拔节期、开花期 (S2)，拔节期、开花期和灌浆期 (S3)。共 4 个处理：N1S3、N1S2、N2S3、N2S2 处理，以拔节期撒施氮肥后畦灌、开花期畦灌的传统灌溉施肥方式为对照 (CK)，每个处理设置 3 个重复。畦灌方法参考文献[16]，具体的试验设计见表 2。滴灌的灌水量根据以往文献中的方法将 0~20 cm 土层（体积质量为 1.35 g/cm^3 ）的平均相对含水率补灌至 100%^[17]。以水表计量灌水量，各时期灌水量见表 3。播前试验田采用复合肥 (N:P:K=15:15:15) 底施纯氮、 K_2O 和 P_2O_5 各 90 kg/hm^2 ，其余氮肥采用尿素（含纯氮 46%）随水等量分次追施。试验地畦宽 2.4 m，行距 20 cm。滴灌带按照“1 管 3 行（60 cm 间距）”方式铺设以保证灌水均匀性。冬小麦播种日期分别为 2019 年 10 月 14 日和 2020 年 10 月 10 日，播种量为 150 kg/hm^2 ，基本苗控制在 200

株/ m^2 ，收获日期分别为 2020 年 6 月 16 日和 2021 年 6 月 19 日。

表 2 试验设计

处理	施氮总量/ ($kg\ hm^{-2}$)	追施氮量/($kg\ hm^{-2}$)		
		拔节期	开花期	灌浆期
CK	240	150	-	-
N1S3	180	30	30	30
N1S2	180	45	45	-
N2S3	210	40	40	40
N2S2	210	60	60	-

表 3 各生育期补灌水量

Table 3 Irrigation volume at different stages of winter wheat							
处理	TTRMC/%	拔节期		开花期		灌浆期	
		PI/ mm	AI/ mm	PI/ mm	AI/ mm	PI/ mm	AI/ mm
2019—2020 年							
CK	-	-	98.7	-	66.6	-	-
N1S3	100	68.6	68.7	27	27.1	42.1	42.3
N1S2		73.2	73.5	30.4	30.5	-	-
N2S3		66.7	66.9	28.3	28.4	39.3	39.5
N2S2		72.1	72.3	31.1	31.2	-	-
2020—2021 年							
CK	-	-	90.5	-	67.4	-	-
N1S3	100	54.8	55.0	21.4	21.7	33.6	33.8
N1S2		63.4	63.8	26.3	26.4	-	-
N2S3		55.6	55.8	23.5	23.7	32.8	33.0
N2S2		64.2	64.5	27.7	27.8	-	-

注 TTRMC 为目标相对含水率；PI 为计划补灌水量；AI 为实际补灌水量。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 群体叶面积指数 (LAI) 及 SPAD

自冬小麦开花后的 0、7、14、21、28 d 随机选取 30 株单茎，采用 LI-3000C 台式叶面积仪测量全绿叶面积，同时采用 SPAD-502 测定旗叶 SPAD。

1.3.2 旗叶光合特性

自冬小麦开花后 0、7、14、21、28 d 于每日 09:00—11:00 使用便携式光合测定仪 (LI-COR 6400) 测定旗叶净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)。

1.3.3 旗叶衰老特性

参考文献[18]的方法测定丙二醛 (MDA) 量，参考文献[19]的方法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性，采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性，采用 Sigma 法测定过氧化物酶 (POD) 活性。

1.3.4 补灌水量测定

采用烘干法测定开花期、成熟期 0~20 cm 土层相对含水率，计算补灌量，并以水表计量。试验地 0~20 cm 土壤体积质量为 1.35 g/cm^3 。计算式为：

$$\text{土壤相对含水率}(\%) = \frac{\text{土壤质量含水率}}{\text{田间持水率}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$\text{土壤贮水量}(\text{mm}) = 0.1 \times \text{土壤体积质量}(\text{g/cm}^3) \times \text{土层厚度}(\text{cm}) \times \text{土壤质量含水率}(\%)。 \quad (2)$$

参照郭增江等^[17]的方法计算农田耗水量：

$$ET=P+CIR+\Delta W, \quad (3)$$

式中： ET 为某阶段农田耗水量 (mm)； P 为降水量 (mm)； CIR 为补灌水量 (mm)； ΔW 为初期与末期土壤贮水消耗量。因田间无地表径流，且地下水位均在 10 m 以下，故未考虑水分渗漏。

1.3.5 籽粒灌浆特性测定

于开花后每隔 7 d 选取 20 株麦穗，直至小麦成熟。于 75 °C 条件下烘干至恒定质量后进行人工脱粒，测定千粒质量，按下式计算灌浆速率：

$$V=(A_2-A_1)/D, \quad (4)$$

式中： V 为籽粒灌浆速率； A_2 为后一时期单粒干物质质量； A_1 为前一时期单粒干物质质量； D 为 2 个时期的间隔天数。

1.3.6 产量及其构成因素

在冬小麦成熟期，于每个小区随机选定 1 m 3 行区域测定有效穗数，随机选取 50 穗测定穗粒数；收取 10 m 6 行测产，同时测定千粒质量。

1.3.7 灌溉水利用效率及氮肥偏生产力计算

灌溉水利用效率及氮肥偏生产力计算的计算公式为：

$$\text{灌溉水利用效率 (kg/(hm}^2\text{ mm))} = \text{籽粒产量 (kg/hm}^2\text{)} / \text{全生育期灌水量(mm)}, \quad (5)$$

$$\text{氮肥偏生产力 (kg/kg)} = \text{籽粒产量 (kg/hm}^2\text{)} / \text{施氮量 (kg/hm}^2\text{)}. \quad (6)$$

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据处理、计算及分析；采用 SPSS 17.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理冬小麦群体叶面积指数 (LAI) 及旗叶 SPAD 的变化

图 1 与图 2 反映了 2019—2021 年冬小麦滴灌不同水氮处理下的群体叶面积指数 (LAI) 及旗叶 SPAD 的动态变化。各处理 LAI 及旗叶 SPAD 在 0 d 时最高，随着生育进程的推进呈下降趋势。开花后 0~7 d, LAI 表现为：CK>3 水处理 (N1S3、N2S3 处理)>2 水处理 (N1S2、N2S2 处理)，且相同灌水频次的滴灌处理间 LAI 无显著差异。开花后 14 d, CK 的 LAI 急剧下降，各处理 LAI 大小依次为：3 水处理>2 水处理、CK。开花后 14~28 d 的 SPAD 大小依次为：N2S3 处理>N1S3 处理>N2S2 处理>N1S2 处理>CK，说明滴灌较传统畦灌更有利于维持灌浆中后期的 LAI 与 SPAD，有利于花后光合同化物的累积，且滴灌条件下灌水频次越多越有利于 LAI 与 SPAD 的维持。

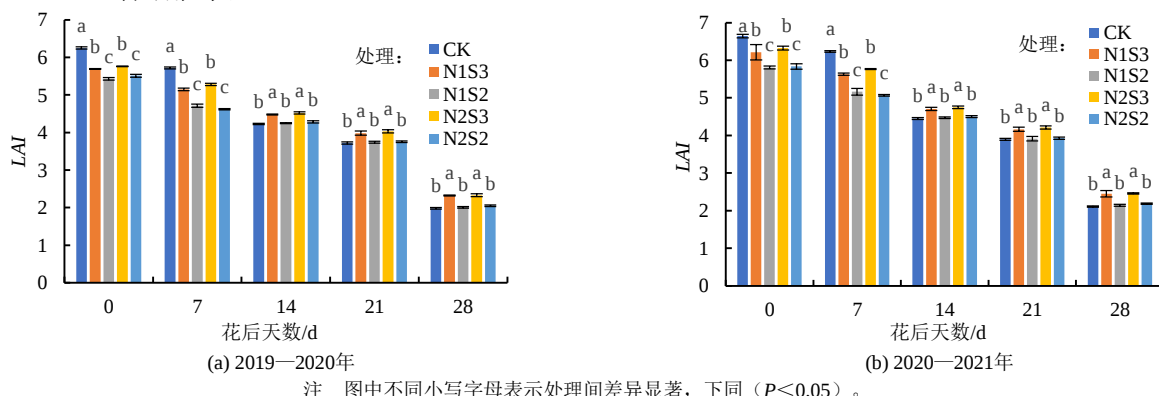


图1 不同处理下的冬小麦旗叶LAI

Fig.1 The flag leaf area index value of wheat under different treatments

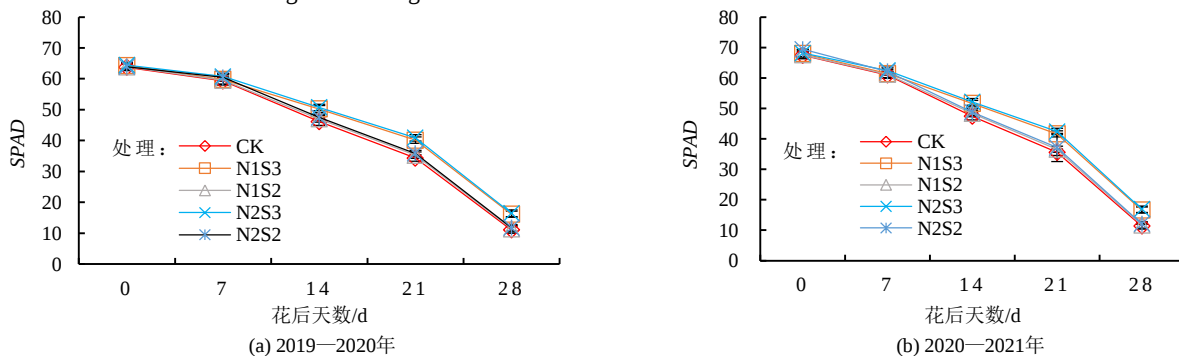


图2 不同处理下的冬小麦旗叶SPAD

Fig.2 The SPAD of flag leaf in winter wheat under different treatments

2.2 不同处理对冬小麦旗叶光合特性的影响

图 3 反映了 2019—2021 年滴灌不同处理下冬小

麦花后旗叶光合特性的动态变化。各处理旗叶净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 和气孔导度 (G_s) 均呈先

升高后降低的趋势, P_n 与 G_s 均在花后 7 d 达到最高值, T_r 则在花后 14 d 达到最高。花后 14 d, 各处理 P_n 与 G_s 急剧下降; 各处理 P_n 、 G_s 大小依次为: N2S3 处理 > N1S3 处理 > N2S2 处理 > N1S2 处理 > CK, 可见, 测墒滴灌能有效提高花后 P_n 、 G_s , 且滴灌频次越

高越有利于 P_n 、 G_s 的提升。N2S3 处理下的 T_r 最高, 可见滴灌施氮量越高、灌水频次越多, 旗叶 T_r 越大。拔节期、开花期、孕穗期测墒滴灌可提高冬小麦旗叶 P_n 、 T_r 、 G_s , 有利于光合产物的积累。

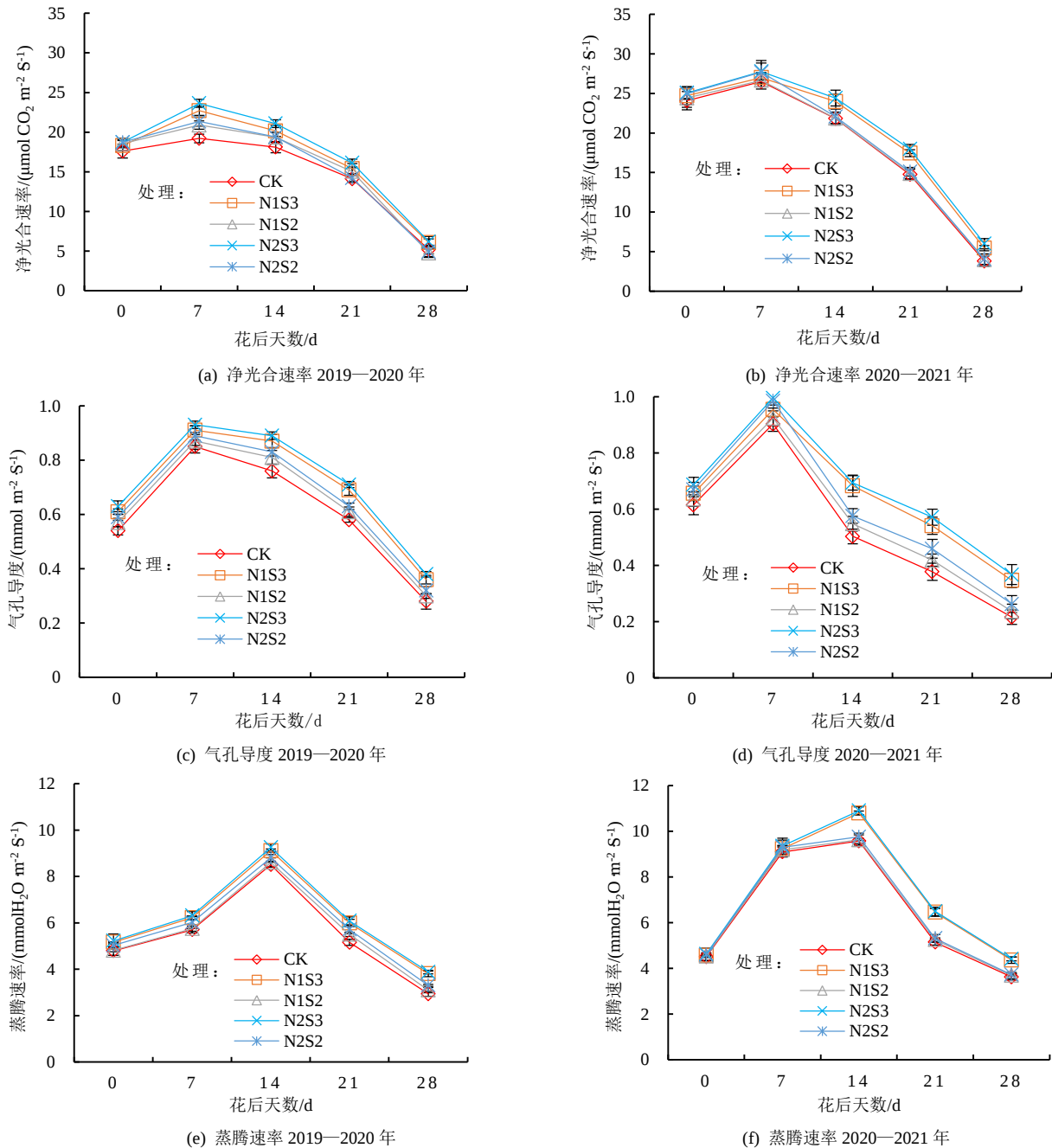


图3 不同处理下的冬小麦旗叶光合特性

Fig.3 The flag leaf photosynthetic characteristics of wheat leaf under different treatments

2.3 不同处理对冬小麦旗叶衰老特性的影响

图4反映了2019—2021年滴灌不同处理下冬小麦花后旗叶衰老特性的动态变化。各处理旗叶SOD、POD和CAT活性均呈先升高后降低的变化规律, MDA量均呈逐步增长趋势。各处理的SOD活性及CK和2水处理的POD和CAT活性在开花后7 d时达到最大, 14 d后开始呈下降趋势; 而3水处理的POD和CAT活性在开花后14 d达到最大, 但与花后

7 d时的差异不大, 在花后21 d时开始呈下降趋势。各处理在花后21 d的SOD、POD活性和CAT值表现为: 3水处理 > 2水处理、CK。各处理的MDA量在花后0~7 d无显著差异, 之后呈上升趋势, 自开花后14 d开始, 各处理MDA量表现为: CK、2水处理 > 3水处理。总体而言, 3次测墒滴灌显著提高了花后旗叶的保护酶活性, 降低了MDA量, 延缓了旗叶的衰老, 维持了花后旗叶较长的功能期。

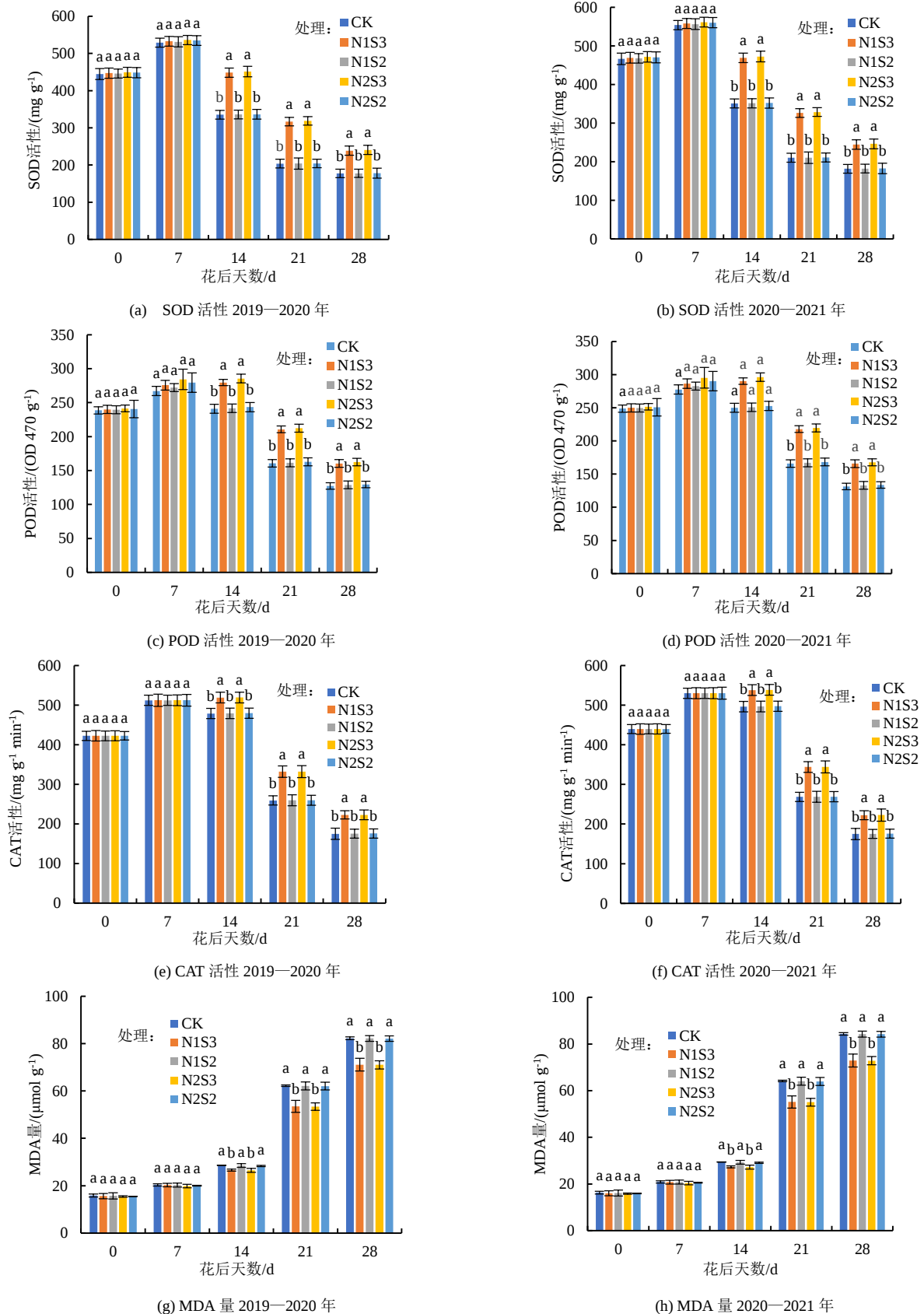


图 4 不同处理下的旗叶衰老特性

Fig.4 The senescence characteristics of flag leaf under different treatments

2.4 不同处理小麦籽粒灌浆特性的变化

图 5 反映了 2019—2021 年滴灌不同处理下冬小麦籽粒灌浆特性的动态变化。开花后 7~14 d 各处理单粒质量无显著差异，花后 21 d，各处理单粒质量快

速增加，至 35 d 达到最大值，其大小表现为：3 水处理 > 2 水处理、CK，花后 35 d，3 水处理的单粒质量较 2 水处理提高了 3.5%~3.7%，较 CK 提高了 6.3%~6.4%。各处理的籽粒灌浆速率整体呈“慢-快-

慢”的变化趋势，花后 21 d 各处理灌浆速率达到最大，表现为：3 水处理>2 水处理、CK，说明最大籽粒灌浆速率的大小显著影响了最终的单粒质量。其中，

3 次测墒滴灌水处理显著提高了开花中后期的籽粒的灌浆速率。

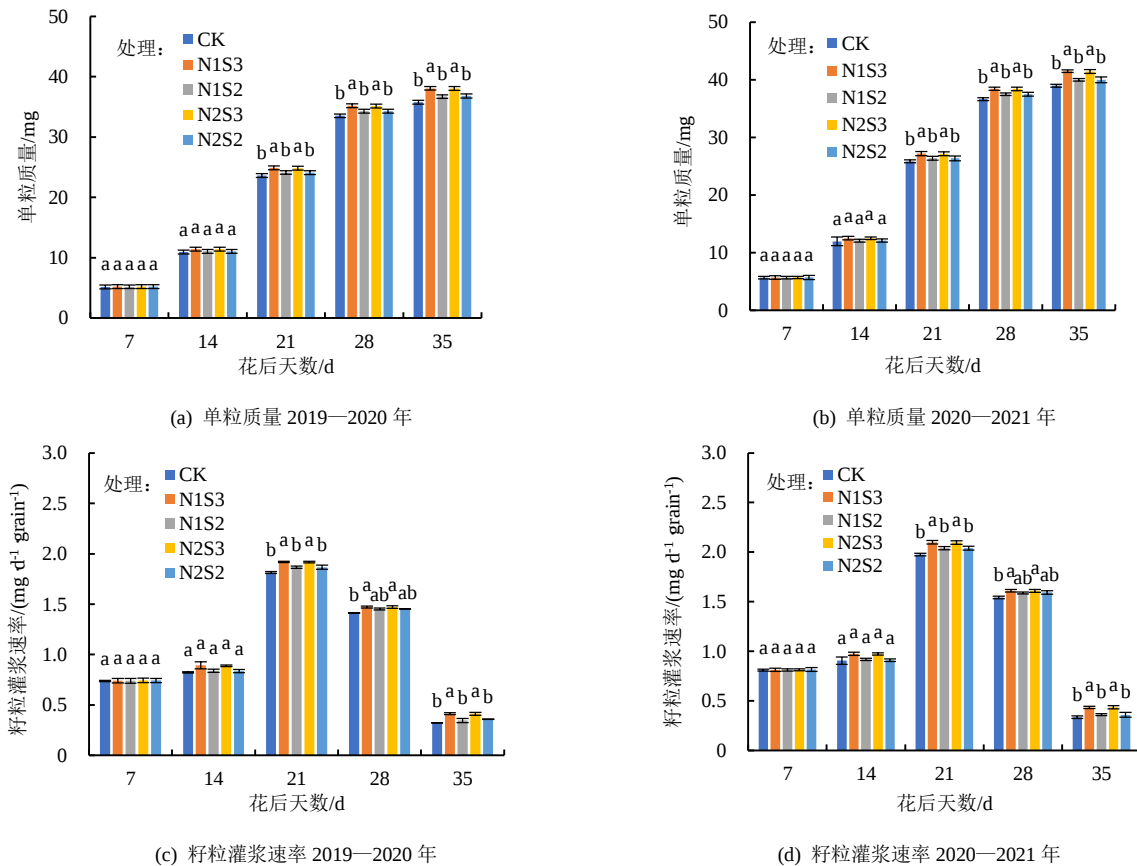


图 5 不同处理对籽粒灌浆特性

Fig.5 The grain filling characteristics under different treatments

2.5 不同处理冬小麦产量及其构成因素、灌溉水利用效率 (IUE) 和氮肥偏生产力 (PFPn)

表 4 反映了 2019—2021 年滴灌不同处理下冬小麦产量及其构成因素和水肥利用效率。各处理穗数和穗粒数均无显著差异，3 水处理的千粒质量和产量均显著高于其他处理。其中，3 水处理的千粒质量和产量较 CK 分别提高了 3.9%~6.6%和 5.2%~10.3%，相同滴灌频次下的千粒质量和产量无显著差异。其中，N1S3 处理的千粒质量和产量的 2 a 均值较 CK 分别提高了 5.3%和 6.2%。各处理灌溉水利用效率 (IUE) 及氮肥偏生产力 (PFPn) 均显著高于 CK，3 水处理与 2 水处理的 IUE 分别较 CK 提高了 27.9%~33.7%和 44.2%~79.3%，3 水处理与 2 水处理的 PFPn 较 CK 分别提高了 24.7%~45.8%和 16.6%~36.4%。其中，N1S3 处理 IUE 和 PFPn 的 2 a 均值较 CK 分别提高了 42.1%和 44.8%，相同滴灌频次下的 IUE 及相同施氮梯度下的 PFPn 差异不显著。总之，3 次测墒滴灌通过增加千粒质量显著提高了产量，并进一步提高了水肥利用效率。

表 4 不同处理小麦产量及其构成因素及水肥利用效率

Table 4 Effects of different treatments on winter wheat yield and yield components and water-fertilizer use efficiency

处理	穗数/ (10 ⁴ hm ⁻²)	穗粒数	千粒 质量/g	产量/ (kg hm ⁻²)	IUE/ (kg hm ⁻² mm ⁻¹)	PFPn/ (kg kg ⁻¹)
2019—2020 年						
CK	666.1a	29.9a	41.1b	6 920.1b	41.9c	28.8c
N1S3	663.9a	30.2a	43.8a	7 409.0a	53.6b	41.2a
N1S2	663.4a	29.8a	42.2b	7 021.9b	67.5a	39.0a
N2S3	676.1a	30.4a	43.7a	7 549.0a	56.0b	35.9b
N2S2	661.5a	30.4a	42.3b	7 067.0b	68.3a	33.7b
2020—2021 年						
CK	676.5a	31.4a	45.8b	8 277.7b	52.1c	34.3c
N1S3	692.6a	32.4a	47.6a	8 707.9a	81.4b	50.0a
N1S2	689.3a	31.3a	46.4a	8 420.7b	93.4a	46.8a
N2S3	705.3a	32.1a	47.7a	9 133.0a	81.2b	43.5b
N2S2	698.1a	31.6a	46.2a	8 480.2b	91.9a	40.4b

注 IUE 为灌溉水利用效率；PFPn 为氮肥偏生产力，同列数字后不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

旗叶的高叶绿素量和 LAI 是保证光合过程高效运行的基础^[10]，而叶面积大小制约着籽粒灌浆速率^[20]。惠海滨等^[21]研究表明，施氮量 300 kg/hm²，越冬期、起身期和拔节期各畦灌 60 mm 水量可显著延缓 SPAD

及 *LAI* 的下降。本研究结果表明, 与 CK 相比, 水肥一体化条件下在拔节期、开花期、灌浆期测墒滴灌显著提高了冬小麦花后 *LAI* 和 *SPAD*, 这可能是由于 CK 在冬小麦生育前期的水氮施用量较大, 导致无效分蘖徒长, 冠层结构光能利用率较低, 养分消耗较大, 而花后有效分蘖养分供应不足, 叶肉细胞活性降低, 导致了 *SPAD* 和 *LAI* 的降低。旗叶的气孔限制及叶肉细胞的光合活性是影响 P_n 的主要原因^[21]。本研究中, 与 CK 相比, 滴灌条件下不同时期测墒滴灌有利于提高冬小麦花后的旗叶 P_n 、 G_s 和 T_r , 有利于光合同化物的累积, 这与郭增江等^[17]研究结果一致。CK 的冬小麦旗叶 P_n 和 G_s 最低, 可能是因为畦灌方式受水分蒸散和地表径流的影响导致灌溉水快速流失, 致使冬小麦生育后期发生水分胁迫, 叶片水分散失且水势下降, 气孔开放程度减小、阻力增加, 导致光合速率下降。

水分胁迫下冬小麦旗叶细胞内自由基代谢平衡被破坏, 过剩自由基加剧了膜脂过氧化作用, 造成旗叶细胞衰老或死亡^[10]。定额灌溉下通过增加灌水频次可有效提高冬小麦花后旗叶细胞内保护酶 (SOD、POD、CAT) 活性, 减少丙二醛 (MDA) 的生成^[11]。研究表明, 施氮量一定时, 滴灌水肥一体化在较畦灌减少 50% 灌水量的情况下旗叶保护酶活性并无显著变化^[21]。本研究证实, 与 CK 相比, 施氮量在 180 kg/hm² 条件下, 拔节、开花、灌浆期 3 次测墒滴灌在与 CK 相近灌溉量条件下提高了花后旗叶 SOD、POD、CAT 活性, 降低了 MDA 量, 而继续增加施氮量至 210 kg/hm² 变化不显著。CK 的保护酶活性降低与过多灌水导致冬小麦群体过大, 冠层透光性差, 大量无效分蘖消耗水分, 加快了叶片衰老。而通过水肥一体化测墒滴灌可在冬小麦生育敏感时期补充水氮, 延缓叶片衰老, 从而有效延长了花后冬小麦旗叶的功能期, 为光合产物的积累奠定了基础。

灌水时期和次数对冬小麦产量影响显著, 0~300 mm 范围内越冬水、拔节水和灌浆水可显著提高冬小麦籽粒产量^[21]。本试验表明, 与 CK 相比, 拔节期、开花期、灌浆期测墒滴灌显著提高了冬小麦千粒质量, 进而提高了籽粒产量, 这可能是由于冬小麦生育前期水分充足而后期水分缺失, 影响了籽粒灌浆速率。籽粒灌浆速率由库强决定, 库强取决于库容量和库活性, 其中库活性包括碳代谢相关酶的活性及其他生理指标^[18]。因此, 本试验中 CK 的灌浆速率降低可能是因为灌浆期缺水限制了籽粒中淀粉合成酶等相关酶活性, 影响了籽粒灌浆速率及籽粒产量的形成, 这与费立伟等^[20]研究结论一致。传统施肥灌溉方式下, 施氮量 90~180 kg/hm² 范围内冬小麦产量随施氮量增加而增加, 施氮量 225~300 kg/hm² 范围内, 增施氮量对产

量无显著提高^[22]。而滴灌水肥一体化条件下减少 25% 施氮量及 52% 灌水量, 籽粒产量和氮肥利用效率较传统灌溉施肥方式 (施氮量 300 kg/hm², 畦灌) 分别提高了 9.4% 和 46.6%^[2]。李小利等^[23]研究指出, 与常规灌溉施肥相比, 滴灌水肥一体化处理水分利用效率提高了 17.2%, 节氮 40% 以上。本试验表明, 与 CK 相比, 拔节、开花、灌浆期 3 次测墒滴灌处理的冬小麦籽粒产量提高了 5.2%~10.3%, 灌溉水利用效率 (*IUE*) 提高了 28.0%~55.8%, 氮肥偏生产力 (*PFPn*) 提高了 24.7%~45.8%, N1 与 N2 氮肥梯度下差异不显著。说明不同时期测墒滴灌水肥一体化的灌溉施肥方式可实现高产高效、节水、节氮的目的。

4 结 论

在水肥一体化按需滴灌条件下, 3 水处理 (N1S3 和 N2S3) 维持了冬小麦开花中后期较高的 *LAI* 和 *SPAD*, 在提升保护酶 (SOD、POD、CAT) 活性的同时降低了 MDA 量, 延缓了旗叶衰老, 保障了旗叶光合性能, 提高了花后籽粒灌浆速率。N1S3 处理的千粒质量和产量较 CK 平均提高了 5.3% 和 6.2%, 氮肥偏生产力 (*IUE*)、灌溉水利用效率 (*PFPn*) 较 CK 平均提高了 42.1% 和 44.8%。N1S3 处理 (总施氮量 180 kg/hm², 拔节期、开花期和灌浆期测墒滴灌水肥) 可作为华北东部地区滴灌水肥一体化节水、节氮和高产的灌溉施肥方式。

参考文献:

- [1] 梅旭荣, 康绍忠, 于强, 等. 协同提升黄淮海平原作物生产力与农田水分利用效率途径[J]. 中国农业科学, 2013, 46: 1 149-1 157.
MEI Xurong, KANG Shaozhong, YU Qiang, et al. Pathways to synchronously improving crop productivity and field water use efficiency in the North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46: 1 149-1 157.
- [2] 郭培武, 赵俊晔, 石玉, 等. 水肥一体化对小麦水分利用和光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1 170-1 178.
GUO Peiwu, ZHAO Junye, SHI Yu, et al. Effects of water-fertilizer integration on water use and photosynthetic characteristics of winter wheat, Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1 170-1 178.
- [3] JU Xiaotang, XING Guangxi, CHEN Xinpeng, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3 041-3 046.
- [4] 张笑培, 周新国, 王和洲, 等. 拔节期水氮处理对冬小麦植株生长及氮肥吸收利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 64-70.
ZHANG Xiaopei, ZHOU Xinguo, WANG Hezhou, et al. The combined impact of irrigation and fertigation on nitrogen uptake of winter wheat at jointing stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 64-70.
- [5] 张依章, 刘孟雨, 唐常源, 等. 华北地区农业用水现状及可持续发展思考[J]. 节水灌溉, 2007(6): 1-3, 6.
ZHANG Yizhang, LIU Mengyu, TANG Changyuan, et al. Discussion on status and sustainable development of agricultural water in North China[J]. Water Saving Irrigation, 2007(6): 1-3, 6.

- [6] FAN Yanli, LIU Junmei, ZHAO Jiatao, et al. Effects of delayed irrigation during the jointing stage on the photosynthetic characteristics and yield of winter wheat under different planting patterns[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 371-376.
- [7] ALI Shahzad, XU Yueyue, JIA Qianmin, et al. Cultivation techniques combined with deficit irrigation improves winter wheat photosynthetic characteristics, dry matter translocation and water use efficiency under simulated rainfall conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 207-218.
- [8] 马守臣, 张伟强, 段爱旺. 不同亏缺灌溉方式对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(8): 9-14.
MA Shouchen, ZHANG Weiqiang, DUAN Aiwan. Effects of different deficit irrigation modes on grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8): 9-14.
- [9] 孙会娜, 王科, 徐心志, 等. 低压喷灌对冬小麦光合作用和叶绿素荧光特征的影响[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(6): 1 216-1 221.
SUN Huina, WANG Ke, XU Xinzhi, et al. Effects of low pressure sprinkler irrigation on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(6): 1 216-1 221.
- [10] 张晓琪, 杨思, 史勇峰, 等. 冬小麦花后旗叶光合特性、碳代谢对灌水时期及次数的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(5): 46-53.
ZHANG Xiaoqi, YANG Si, SHI Yongfeng, et al. Responses of photosynthetic characteristics and carbon metabolism of flag leaves of winter wheat after anthesis to irrigation period and frequency[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(5): 46-53.
- [11] SHI Jianchu, YASOUR Hagai, YERMIYAHU Uri, et al. Dynamic responses of wheat to drought and nitrogen stresses during re-watering cycles[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146: 163-172.
- [12] 黄玲, 杨文平, 胡喜巧, 等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 168-174.
HUANG Ling, YANG Wenping, HU Xiqiao, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water consumption characteristics and nitrogen utilization of winter wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 168-174.
- [13] TIAN Di, ZHANG Yuanyuan, MU Yujing, et al. The effect of drip irrigation and drip fertigation on N₂O and NO emissions, water saving and grain yields in a maize field in the North China Plain[J]. *Ecology Environment & Conservation*, 2017, 575: 1 034-1 040.
- [14] 武继承, 杨光辉, 潘晓莹, 等. 测墒灌溉条件下不同养分配置对小麦-玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *河南农业科学*, 2017, 46(9): 11-17.
WU Jicheng, YANG Yonghui, PAN Xiaoying, et al. Effect of different nutrients allocation under measuring-irrigation on yield and water use efficiency of wheat and corn[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(9): 11-17.
- [15] 石玉, 于振文, 何建宁, 等. 不同测墒补灌水平对小麦水氮利用及土壤硝态氮淋溶的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 445-452.
- SHI Yu, YU Zhenwen, HE Jianning, et al. Effects of supplemental irrigation by monitoring soil moisture on the water-nitrogen utilization of wheat and soil NO₃-N leaching[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(2): 445-452.
- [16] 马尚宇, 于振文, 王东, 等. 不同畦长灌溉对小麦耗水特性及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2 489-2 496.
MA Shangyu, YU Zhenwen, WANG Dong, et al. Effects of field border length for irrigation on the water consumption characteristics and grain yield of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(9): 2 489-2 496.
- [17] 郭增江, 于振文, 石玉, 等. 拔节期与开花期测墒补灌对小麦旗叶荧光特性和水分利用效率的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(7): 757-766.
GUO Zengjiang, YU Zhenwen, SHI Yu, et al. Effects of supplemental irrigation by measuring the moisture content at jointing and anthesis on fluorescence characteristics and water use efficiency in flag leaves of wheat[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(7): 757-766.
- [18] 彭长连, 林植芳, 林桂珠. 高 CO₂ 浓度对水稻叶片膜脂过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. *中国水稻科学*, 1999(1): 41-45.
PENG Changlian, LIN Zhifang, LIN Guizhu. Effect of elevated CO₂ concentration lipid peroxidation and activities of antioxidative enzymes in rice leaves[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1999(1): 41-45.
- [19] 王爱国, 罗广华, 邵从本, 等. 大豆种子超氧化物歧化酶的研究[J]. *植物生理学报*, 1983, 9(1): 77-84.
WANG Aiguo, LUO Guanghua, SHAO Congben, et al. A study on the superoxide dismutase of soybean seeds[J]. *Plant Physiology Journal*, 1983, 9(1): 77-84.
- [20] 费立伟, 代兴龙, 张秀, 等. 花后高温胁迫下晚播对冬小麦灌浆特性和粒重的影响[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(3): 479-488.
FEI Liwei, DAI Xinglong, ZHANG Xiu, et al. Effect of late sowing on grain filling characteristics and grain weight in winter wheat under heat stress after flowering[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(3): 479-488.
- [21] 惠海滨, 刘义国, 刘家斌, 等. 灌水量和灌水期对超高产小麦花后旗叶衰老及产量的影响[J]. *农学学报*, 2012, 2(5): 17-23.
HUI Haibin, LIU Yiguo, LIU Jiabin, et al. Effects of irrigation amount and stage on the flag leaf senescence and yield of super-high-yield wheat after anthesis[J]. *Journal of Agriculture*, 2012, 2(5): 17-23.
- [22] 位国峰, 林琪, 商健, 等. 不同滴灌量对冬小麦水分利用及品质的影响[J]. *华北农学报*, 2015(4): 200-205.
WEI Guofeng, LIN Qi, SHANG Jian, et al. Effects of different drip irrigation amount on water use efficiency and quality of winter wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015(4): 200-205.
- [23] 李小利, 李昊儒, 郝卫平, 等. 滴灌施肥对华北小麦-玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(4): 18-28.
LI Xiaoli, LI Haoru, HAO Weiping, et al. Impact of drip fertigation on yields and water use efficiency of wheat-maize rotation in North China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(4): 18-28.

The Effects of Different Irrigation and Nitrogen Fertilization on Photosynthesis, Protective Enzyme Activity of Flag Leaf and Yield of Drip-irrigated Winter Wheat

ZHAO Jinke, XU Xuexin, QU Wenkai, LIU Shuai, XU Yufan, MENG Fangang, JIA Jing, ZHAO Changxing*

(Qingdao Agricultural University, College of Agriculture/

Shandong Provincial Key Laboratory of Dryland Farming Agricultural Technology, Qingdao 266109, China)

Abstract: 【Objective】 Crop growth and its ultimate yield depend not only on irrigation and fertilization amounts but also on the timing of their application. Taking winter wheat as an example, this paper investigates how irrigating and nitrogen-fertilizing time affects photosynthesis, protective enzyme activity of flag leaf and grain yield. 【Method】 The field experiment was conducted in the 2019—2020 season with Jimai 22 used as the model plant. We compared

two nitrogen fertilizations: 180 kg/hm² (N1) and 210 kg/hm² (N2), with each applied at jointing and anthesis stages (S2), or at jointing, anthesis and filling stages (S3). Crops in both N treatments were drip-irrigated with the irrigation amount determined by crop demand for water. The control (CK) was traditional border irrigation coupled with 240 kg/hm² of N fertilization, with 90 kg/hm² of the N used as basal fertilizer and the remaining top-dressed at jointing and anthesis stages, respectively. In each treatment, we measured the photosynthesis, senescence of flag leaf, yield formation and water-nitrogen use efficiency. **【Result】** Increasing irrigation frequency led to an increase in *LAI*, *SPAD* of the flag leaf, net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, as well as the content of SOD, POD, CAT, and grain filling rate. In contrast, the content of MDA decreased as the irrigation frequency increased. When nitrogen application was increased from 180 kg/hm² to 210 kg/hm², there was no significant change in the physiological indices. Maintaining water content in the top 0~20 cm of soil at 100% of the relative water content delayed the commencement of the decrease in photosynthesis and senescence of flag leaf, while increasing the grain weight and grain filling rate significantly during the middle-late anthesis. Compared with CK, N1+S3 increased grain quality by 5.3%, yield by 6.2%, nitrogen fertilizer partial productivity (*PFPn*) and irrigation water use efficiency (*IUE*) by 42.1% and 44.8%, respectively. Considering crop growth traits, yield, *IUE* and *PFPn*, N1+S3 is optimal for water and fertilizer use efficiency, and can be used as an improved water-nitrogen practice for drip-irrigating winter wheat in the Eastern North China Plain.

Key words: drip irrigation integration of water and fertilizer; winter wheat; photosynthetic characteristics; senescence characteristics; yield

责任编辑：韩 洋

(上接第 32 页)

Effects of Climate Change on Seed Yield and Water Use Efficiency of Cotton in Arid Regions: A Simulation Study

DONG Haibo, CHEN Xiaoping*, FENG Shaoyuan, ZHANG Youliang, WU Hao

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: **【Objective】** One challenge facing agricultural production in many countries is the potential influence of global warming. The purpose of this paper is to elucidate the potential impact of climate change on cotton production in arid regions in north China. **【Method】** The study was based on numerical simulation. The root zone water quality model (RZWQM2) was calibrated using data measured in 2018 from cotton fields at Qira Oasis in Xinjiang. The validated model was then used to analyze the effect of climate change (1960—2019) on growth, yield and irrigation water use efficiency (*IWUE*) of the cotton. The relationship between climate factors and cotton yield was analyzed using correlation methods. **【Result】** Comparison with measured data shows that the RZWQM2 is accurate to simulate change in water content in the soil profile except in the depth of 0.15~0.25 m. It also adequately predicts the cotton growth and yield, with the average consistency index > 0.75. The simulation results show that the emergence, flowering, cracked B1 and maturity stage of the cotton were delayed approximately by 1.1, 2.1, 3.5 and 3.5 d per decade, respectively, from 1960—2019 due to temperature rise. The simulated seed yield and *IWUE* of the cotton decreased by 45.95 kg/hm² and 0.13 kg/(mm hm²) per decade, respectively, from 1990—2019. Correlation analysis reveals that air temperature and solar radiation affect cotton growth most significantly. The minimum temperature is the dominant determinant of cotton growth, while the maximum temperature has a negative effect on cotton yield. Among others, solar radiation is the most important determinant of cotton yield. **【Conclusion】** Using the calibrated numerical model, we analyze the potential impact of climate change and different meteorological factors on growth and yield of cotton in arid regions in north China. The results provide baseline to understand how cotton production will change with climate change in the Oasis regions in Xinjiang.

Key words: RZWQM2; climate change; cotton production; *IWUE*; oasis agriculture

责任编辑：韩 洋