

网络出版时间:2026-03-16

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260313.1807.004

不同水氮处理对滴灌冬小麦灌浆期光合特性、 产量及水氮利用效率的影响

张志辉¹, 登斯拉木·吐尔逊拜¹, 杨 蕙¹, 邹 辉¹, 黄倩楠¹,
马 龙^{1,2}, 张飞飞³, 马 林¹, 张学慧¹, 孙 娜¹, 温切木·阿不拉⁴

(1. 伊犁哈萨克自治州农业科学研究所/伊犁州农作物育种及品质检测重点实验室, 新疆伊宁 835000; 2. 石河子大学农学院, 新疆石河子 832061; 3. 新疆农业大学农学院/新疆农业大学优质专用麦类作物工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830052; 4. 新疆自治区耕地质量监测保护中心, 新疆乌鲁木齐 830049)

摘要: 为探究不同水氮处理对滴灌冬小麦灌浆期光合特性、产量及水氮利用效率的影响, 以伊农 22 为供试品种, 设置 5 250(W_1)、6 000(W_2)和 6 750(W_3) $m^3 \cdot hm^{-2}$ 共 3 个滴灌水平和 0(N_0)、240(N_1)和 300(N_2) $kg \cdot hm^{-2}$ 共 3 个施氮水平, 分析不同水氮处理对冬小麦灌浆期叶绿素相对含量(SPAD)、光合参数、叶面积指数(LAI)、干物质积累量、产量及水氮利用效率的影响, 并通过路径分析揭示各因素对产量的影响。结果表明, 灌溉量和施氮量显著影响开花期至花后 20 d 的 SPAD、LAI、光合参数(C_i 、 G_s 、 P_n 和 T_r)、单株干物质积累量(叶鞘、籽粒和茎), 在 W_2N_1 处理条件下, 继续增加水氮供应, 上述指标无明显增加。 W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_3N_1 和 W_3N_2 处理的产量显著高于 W_1N_0 、 W_1N_1 、 W_1N_2 、 W_2N_0 和 W_3N_0 处理, W_2N_2 处理的产量最高(8 395.88 $kg \cdot hm^{-2}$), 其次为 W_2N_1 处理(8 208.37 $kg \cdot hm^{-2}$); W_2N_1 处理灌溉水利用效率达 1.37 $kg \cdot m^{-3}$, 显著高于 W_3N_1 处理(1.22 $kg \cdot m^{-3}$)和 W_3N_2 处理(1.23 $kg \cdot m^{-3}$); 降水利用效率以 W_2N_2 处理最高, 达 33.66 $kg \cdot mm^{-1} \cdot hm^{-2}$, 与 W_2N_1 处理无显著差异; W_2N_1 处理的氮肥偏生产力(34.20 $kg \cdot kg^{-1}$)和氮肥农学利用率(6.08 $kg \cdot kg^{-1}$)均最高。通过路径分析发现, 光合特性、干物质积累量和农艺性状直接调控小麦产量, 效应值分别为 0.889、0.334 和 0.137, 水氮处理通过间接途径影响小麦产量, 间接效应值 1.27。综上, 光合特性是影响小麦产量的重要因子, 水氮处理主要通过光合特性的间接驱动影响产量。在伊犁河谷滴灌条件下, 综合考虑产量与水氮利用效率, 滴灌量 6 000 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 配合施氮量 240 $kg \cdot hm^{-2}$ (W_2N_1 处理)为最优水氮组合。

关键词: 冬小麦; 光合特性; 水氮耦合; 产量; 水氮利用效率

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)04-0482-11

Effects of Different Water and Nitrogen Treatments on Photosynthetic Characteristics, Yield and Water-Nitrogen Efficiency of Winter Wheat under Drip Irrigation during Grain Filling Stage

ZHANG Zhihui¹, TUERBAIXUN · Dengsilamu¹, YANG Hui¹, ZOU Hui¹, HUANG Qiannan¹,
MA Long^{1,2}, ZHANG Feifei³, MA Lin¹, ZHANG Xuehui¹, SUN Na¹, WENQIEMU · Abula⁴

(1. Ili Kazakh Autonomous Prefecture Institute of Agricultural Science/Key Laboratory of Crop Breeding and Quality Inspection in Ili Prefecture, Yili, Xinjiang 835000, China; 2. Agricultural College of Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832061, China; 3. College of Agronomy/Special High Quality Triticeae Crops Engineering and Technology Research Center, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 4. Xinjiang Uygur Autonomous Region Cultivated Land Quality Monitoring and Protection Center, Urumqi, Xinjiang 830049, China)

收稿日期: 2025-06-06

修回日期: 2025-07-29

基金项目: 新疆维吾尔自治区“天山英才”人才培养项目(2022TSYCJC0051); 新疆维吾尔自治区重点研发项目(2022B02015-2); 新疆小麦产业技术体系专项(XJARS-01)

第一作者 E-mail: zhangzhihui0105@163.com(张志辉)

通讯作者 E-mail: Sna18509993321@163.com(孙娜); xjtlzh_flk@126.com(温切木·阿不拉)

Abstract: To investigate the effects of different water and nitrogen treatments on photosynthetic characteristics, yield and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat during the grain-filling stage, a field experiment was conducted using the cultivar Yinong 22. Three drip irrigation levels 5 250(W_1), 6 000(W_2) and 6 750(W_3) $m^3 \cdot hm^{-2}$ and three nitrogen application rates 0(N_0), 240(N_1) and 300(N_2) $kg \cdot hm^{-2}$ were established to analyze the impacts of water-nitrogen combinations on chlorophyll relative content (SPAD), photosynthetic parameters, leaf area index (LAI), dry matter accumulation, yield and water-nitrogen use efficiency, and the response of each factor to yield was revealed by path analysis. The results showed that irrigation amount and nitrogen application rate significantly affected SPAD, LAI, photosynthetic parameters (C_i , G_s , P_n and T_r) and dry matter accumulation per plant (leaf sheath, grain and stems) from anthesis to 20 days after anthesis. Under W_2N_1 treatment, the above indices did not increase significantly with the increase of water and nitrogen supply. Analysis of yield and water-nitrogen use efficiencies revealed that yields under W_2N_1 , W_2N_2 , W_3N_1 and W_3N_2 treatments were significantly higher than those under W_1N_0 , W_1N_1 , W_1N_2 , W_2N_0 and W_3N_0 treatments. The highest yield was achieved under W_2N_2 treatment (8 395.88 $kg \cdot hm^{-2}$), followed by that under W_2N_1 treatment (8 208.37 $kg \cdot hm^{-2}$). Irrigation water use efficiency under W_2N_1 treatment reached 1.37 $kg \cdot m^{-3}$, significantly surpassing that of the W_3N_1 (1.22 $kg \cdot m^{-3}$) and W_3N_2 (1.23 $kg \cdot m^{-3}$) treatments. Precipitation use efficiency was highest under W_2N_2 treatment (33.66 $kg \cdot mm^{-1} \cdot hm^{-2}$), showing no significant difference from the W_2N_1 treatment. Both partial factor productivity of nitrogen (34.20 $kg \cdot kg^{-1}$) and agronomic nitrogen use efficiency (6.08 $kg \cdot kg^{-1}$) were highest under W_2N_1 treatment. Path analysis showed that photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and agronomic traits direct regulated wheat yield, and the direct effect values were 0.889, 0.334 and 0.137, respectively. Water and nitrogen input mainly affected wheat yield through indirect pathway, and the indirect effect value was 1.27. In summary, photosynthetic characteristics are important factors affecting wheat yield, and water and nitrogen inputs affect yield mainly through the indirect drive of photosynthetic characteristics. Under the condition of drip irrigation in the Ili River Valley, taking yield and water and nitrogen use efficiency into consideration, the recommended drip irrigation amount is 6 000 $m^3 \cdot hm^{-2}$, and the nitrogen application rate is 240 $kg \cdot hm^{-2}$ (W_2N_1) is the optimal combination.

Keywords: Winter wheat; Photosynthetic characteristics; Water-nitrogen coupling; Yield; Water and nitrogen use efficiency

新疆是中国重要的粮食生产基地,小麦种植面积、单产、总产长期位居西北第一、全国第六位,其高产稳产对国家粮食安全至关重要^[1]。灌水和施用氮肥是确保小麦高产稳产的重要栽培手段,然而过量的灌水和氮肥输入不仅无法显著提高产量,还会造成资源浪费和经济损失^[2-3]。因此,在保障产量的前提下提高水氮利用效率,是实现小麦可持续发展的重要方向^[4]。伊犁河谷是新疆重要的粮食产区,2023年其小麦种植面积 12.95×10^4 hm^2 ,产量为 77.92 万吨,对保障区域粮食安全有重要作用^[5]。

开花至灌浆期是小麦生长发育的关键阶段,该时期叶片光合能力对最终产量和品质至关重

要^[6]。小麦籽粒产量的 90%~95% 来源于光合作用,水、氮是影响光合作用不可缺少的因素^[7]。前人发现,充分灌水条件下,小麦旗叶光合速率随着灌溉量的增加呈先升后降的趋势,存在最优水分阈值;而轻度亏缺灌溉下,旗叶光合速率变化不显著^[8]。施氮能增加小麦旗叶的光合能力,延缓叶片衰老,过量施氮则抑制光合强度,影响作物养分利用^[9]。此外,水氮互作的增产效应往往大于单因素效应,适宜的水氮运筹能显著提高旗叶的叶绿素相对含量 (SPAD 值)、营养器官干物质累积和转运量,延长光合作用持续期^[10]。前人对不同水氮条件下小麦的光合特征进行了大量的研究,但合理的水氮配比往往需要综合考虑区域降

雨、供水状况及物候期等因素。新疆水资源紧缺,滴灌作为一种先进的节水灌溉技术,不仅可以节约灌水,还可以提高水肥利用效率,实现减水、减肥、增产、高效的目标^[11],是新疆小麦生产的方向^[12]。基于此,本研究拟在新疆伊犁河谷冬小麦种植区,研究滴灌条件下不同水氮组合对小麦灌浆期光合特性、干物质积累和转运、水氮利用效率和产量的影响,旨在从光合特征角度阐述灌浆期冬小麦对水氮耦合的响应机制,明确该地区冬小麦滴灌量和施氮量的优配模式,为其绿色高产高效栽培提供技术支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

试验于 2022—2023 年在伊犁哈萨克自治州农业科学研究所试验地(43°56′11″N,81°23′9″E,海拔 650 m)进行。该区属于温带内陆性气候,小麦生育期内平均气温 9.4℃,最高气温 40.6℃,最低气温 -24.2℃,全年无霜期 193 d,降水量

249.4 mm,蒸发量 1 251.7 mm,详细生育期降水量及温度见图 1。试验地前茬为玉米,土壤为灰钙土,耕层土壤有机质含量 17.45 g·kg⁻¹,全氮含量 0.91 g·kg⁻¹,速效磷含量 38.61 mg·kg⁻¹,速效钾含量 288 mg·kg⁻¹,pH 为 7.72。

1.2 试验设计

供试材料为小麦品种伊农 22。试验采用双因素裂区设计,滴灌量为主区,依据该地区高产田灌溉实践设置 3 个水平,分别为 5 250(W₁)、6 000(W₂)和 6 750(W₃) m³·hm⁻²;施氮量为副区,3 个处理分别为 0(N₀)、240(N₁)和 300(N₂) kg·hm⁻²。小区面积为 20 m²(5 m×4 m),3 次重复,行距 20 cm,小区间隔 2 m。氮、磷、钾肥选用尿素(含氮 46%)、过磷酸钙(含磷 12%)和硫酸钾(含钾 50%)。具体水氮设置见表 1。滴灌带铺设采用 1 管 4 行铺设毛管,过磷酸钙(P₂O₅ 180 kg·hm⁻²)和硫酸钾(K₂O 75 kg·hm⁻²)作为基肥一次性施入。小麦生育期病虫害管理同当地高产田一致。

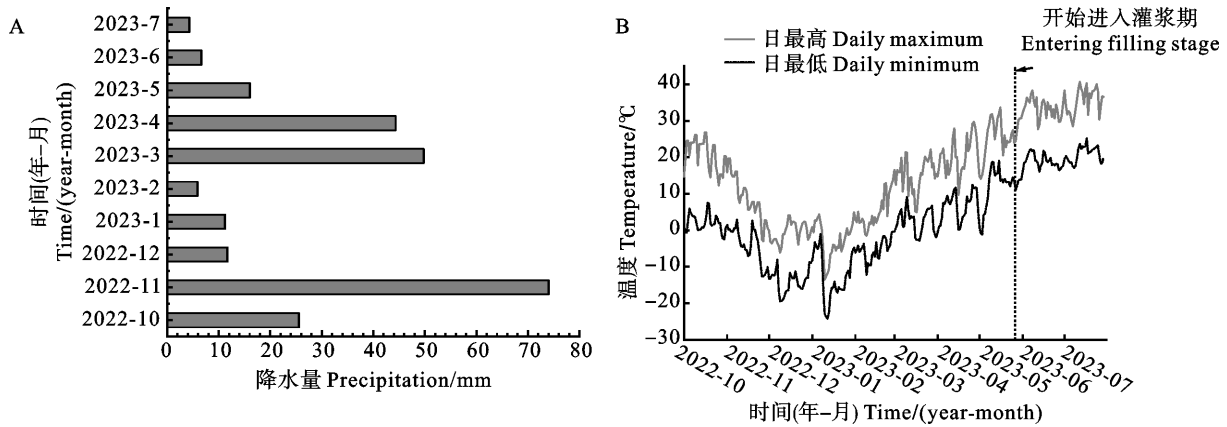


图 1 小麦生育期降水量(A)及温度(B)
Fig. 1 Precipitation(A) and temperature(B) during wheat growthperiod

表 1 各处理不同生育阶段滴灌量和施氮量

Table 1 Amount of drip irrigation and nitrogen application at different growth stages under different treatments

处理 Treatment	滴灌量 Irrigation amount /(m ³ ·hm ⁻²)							施氮量 Nitrogen amount/ (kg·hm ⁻²)		总灌水量 Total irrigation amount/ (m ³ ·hm ⁻²)	总施氮量 Total nitrogen amount/ (kg·hm ⁻²)
	苗期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Anthesis stage	花后 10 d Anthesis 10 days after anthesis	花后 20 d Anthesis 20 days after anthesis	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage		
W ₁ N ₀	750	750	750	750	750	750	750	0	0	5 250	0
W ₁ N ₁	750	750	750	750	750	750	750	100	140	5 250	240
W ₁ N ₂	750	750	750	750	750	750	750	120	180	5 250	300
W ₂ N ₀	870	870	870	870	870	870	780	0	0	6 000	0
W ₂ N ₁	870	870	870	870	870	870	780	100	140	6 000	240
W ₂ N ₂	870	870	870	870	870	870	780	120	180	6 000	300
W ₃ N ₀	970	970	970	970	970	970	930	0	0	6 750	0
W ₃ N ₁	970	970	970	970	970	970	930	100	140	6 750	240
W ₃ N ₂	970	970	970	970	970	970	930	120	180	6 750	300

1.3 测定项目和方法

1.3.1 叶面积指数(LAI)测定

抽穗期选取长势一致的小麦主茎 100 株进行标记,分别在开花期、花后 10 d 和花后 20 d,选取标记植株 20 株,用直尺测植株所有绿色叶片的长和宽,计算叶面积指数(LAI)。

1.3.2 旗叶绿素相对含量(SPAD 值)及光合参数测定

分别于开花期、花后 10 d 和花后 20 d 采用叶绿素仪(SPAD-502, Minolta Camera Co., Osaka, Japan)测定标记小麦旗叶 SPAD 值,每小区 10 个重复。选择晴好天气,在 10:00—13:00 期间,每小区选择 5 株标记单株,采用便携带手持式光合作用测量仪(LI-6400, COR, America)测定小麦旗叶净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、蒸腾速率(transpiration rate, T_r)、气孔导度(stomatal conductance, G_s)和胞间 CO_2 浓度(intercellular CO_2 concentration, C_i)。

1.3.3 干物质积累量、株高、穗长及产量测定

成熟期每小区取 10 个标记单株,测定株高、穗长,随后将植株分为叶鞘、籽粒、茎三个部分,105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干 24 h,称干重,计算干物质积累量。按小区实打实收,风干后按 13%含水量计算产量。

1.3.4 小麦水、氮利用效率计算

灌溉水利用效率=小麦籽粒产量/总灌水量;

降水利用效率=小麦籽粒产量/小麦全生育期降水量;

氮肥农学利用率=(施氮区籽粒产量-未施氮区籽粒产量)/施氮量;

氮肥偏生产力=籽粒产量/施氮量。

1.4 数据处理

使用 Excel 2021 和 SPSS 27 进行数据整理与分析,采用 DPS 的 LSD 法进行方差分析,使用 R 语言(4.4.3)的 plspm 软件包,基于偏最小二乘法构建路径分析模型,用 Origin 2022 进行图像绘制。

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对灌浆期冬小麦 SPAD 值及 LAI 的影响

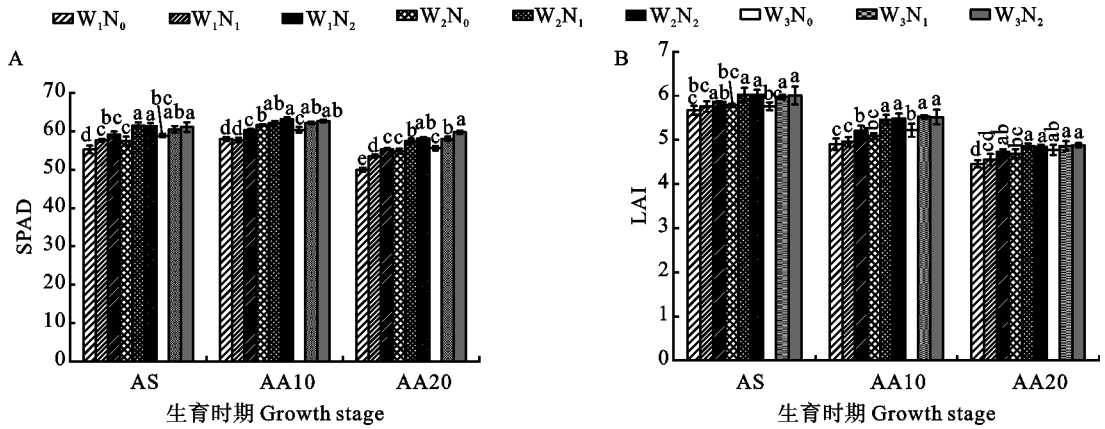
滴灌量和施氮量对小麦旗叶 SPAD 值均有显著影响($P < 0.05$),SPAD 值从开花期至花后 10 d 呈缓慢上升,花后 10 d 至花后 20 d 呈现明显下降(图 2A)。在相同施氮量条件下,相同时期 W_2 和 W_3 处理的 SPAD 值均显著高于 W_1 处理,

除花后 10 d 的 W_2N_0 与 W_3N_0 处理间存在显著差异外,其余相同时期 W_2 与 W_3 处理间差异均不显著。同一灌溉量条件下,开花期至花后 20 d 的 SPAD 值表现为 N_1 、 N_2 处理较 N_0 处理分别增加 6.05%、6.35%, N_1 较 N_2 处理增幅较小,仅 0.29%。以上结果表明,适宜的滴灌量和施氮量有利于保持小麦灌浆期旗叶较高的叶绿素含量,继续增加水氮用量对叶绿素含量影响较小。

不同水氮处理下冬小麦 LAI 随生育进程的推进呈逐渐降低趋势(图 2B),滴灌量和施氮量均对 LAI 有显著影响($P < 0.05$)。相同滴灌量条件下,相同时期 N_1 和 N_2 处理的 LAI 均高于 N_0 处理;相同施氮量条件下,相同时期 W_2 和 W_3 处理的 LAI 均高于 W_1 处理。不同水氮处理中,开花期和花后 10 d 的 LAI 均表现为 W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_3N_1 和 W_3N_2 处理显著高于其余 5 个(W_1N_0 、 W_1N_1 、 W_1N_2 、 W_2N_0 和 W_3N_0)处理;花后 20 d 表现为 W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_3N_1 和 W_3N_2 处理显著高于 W_1N_0 、 W_1N_1 、 W_2N_0 处理,与 W_1N_2 和 W_3N_0 处理无显著差异。以上结果表明,滴灌量或施氮量的增加可有效增加小麦灌浆期的 LAI,其中 W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_3N_1 和 W_3N_2 处理效果较好。

2.2 不同水氮处理对灌浆期冬小麦光合生理特征的影响

随着生育期的推移,不同水氮处理下小麦旗叶净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)均呈逐渐降低趋势(图 3A 和图 3B)。相同滴灌量下,与 N_0 处理相比,除开花期至花后 20 d 的 W_1N_0 与 W_1N_1 处理间差异不显著外,其余时期下 N_1 和 N_2 处理均显著提高了旗叶净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s);相同施氮量下,与 W_1 处理相比,除开花期至花后 20 d 的 W_1N_0 与 W_1N_1 处理间、花后 20 d 的 W_1N_0 与 W_1N_2 处理间差异不显著外,其余相同时期的 W_2 和 W_3 处理均显著提高了旗叶净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)。在开花期至花后 20 d,不同水氮处理的胞间 CO_2 浓度(C_i)均表现为 W_1N_0 处理最低、 W_2N_2 处理最高(图 3C)。蒸腾速率(T_r)在开花期和花后 10 d 表现为 W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_3N_1 和 W_3N_2 处理显著高于 W_1N_0 、 W_1N_1 、 W_1N_2 、 W_2N_0 和 W_3N_0 处理,至花后 20 d,不同水氮组合处理对 T_r 的影响逐渐降低(图 3D)。



AS: 开花期; AA10: 花后 10 d; AA20: 花后 20 d; 相同时期图柱上不同字母表示不同处理间差异在 0.05 水平显著。下同。

AS: Anthesis; AA10: 10 days after anthesis; AA20: 20 days after anthesis; Different letters above columns at the same stage indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same in figures 3 and 4.

图 2 不同水氮处理灌浆期 SPAD 值(A)和 LAI(B)

Fig. 2 SPAD(A) and LAI(B) of different water and nitrogen treatments at grain-filling stage

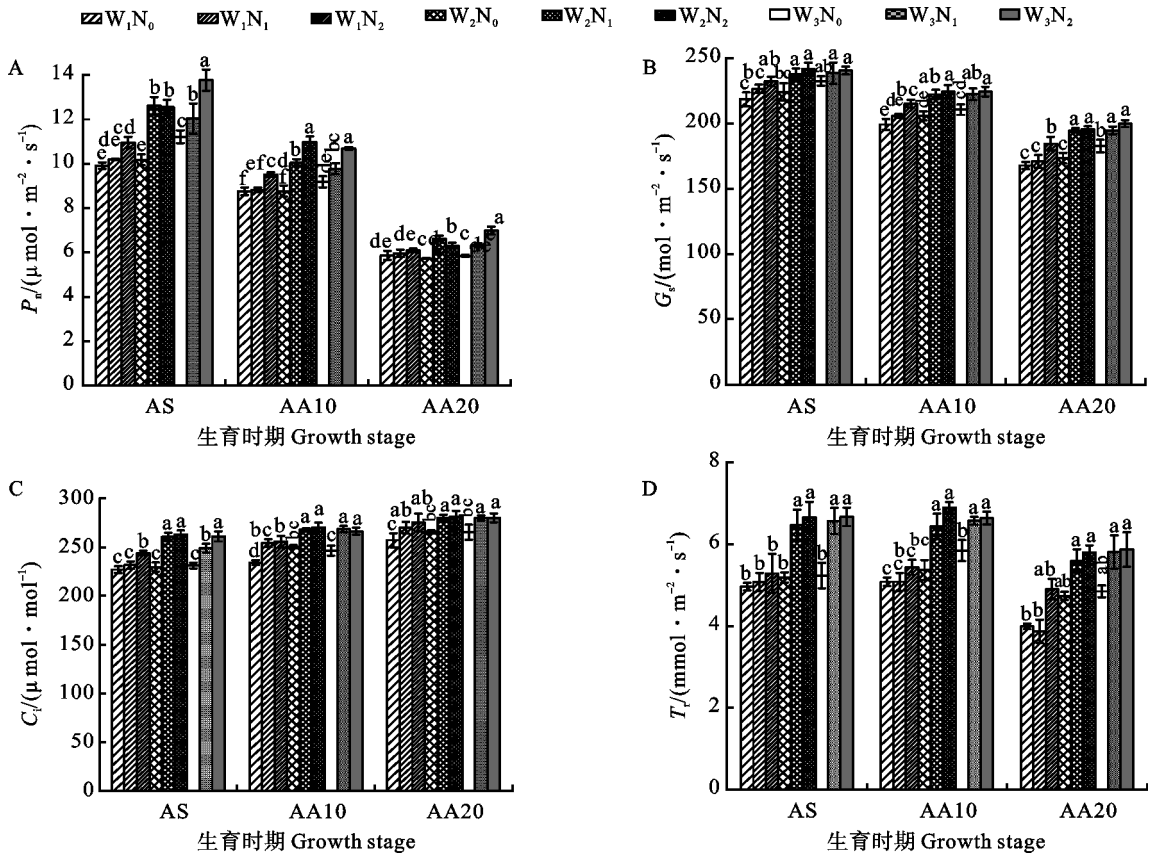


图 3 不同水氮处理灌浆期光合参数

Fig. 3 Photosynthetic parameters at grain-filling stage under different water and nitrogen treatments

2.3 不同水氮处理对冬小麦各器官干物质积累量及分配的影响

比较不同处理的单株干物质积累量发现,相同滴灌量下的, N₀ 处理较 N₁ 处理增加显著, N₁ 与 N₂ 处理间差异不显著; 相同施氮量下, W₁ 处

理较 W₂ 处理增加显著, W₂ 处理与 W₃ 处理间差异不显著(图 4A)。随着灌溉量和施氮量的共同增加, 冬小麦干物质积累量呈增加趋势, 在叶鞘、籽粒和茎中, W₃N₂ 处理较 W₁N₀ 处理的干物质积累量均显著增加, 增幅分别为 35.26%、38.32% 和

23.13%。以上结果表明,灌水和施氮可显著促进冬小麦干物质的累积,但过量灌水和施氮对单株干物质积累量的增加效果不显著。由图 4B 可知,水氮组合对冬小麦各营养器官中干物质积累量的分配比例影响较小,其中,叶鞘的分配比例范围为 12.55%~13.83%, W_1N_1 处理最高(13.83%);

籽粒的分配比例范围为 32.62%~35.01%, W_2N_1 处理最高(35.01%);茎的分配比例范围为 51.55%~54.44%, W_1N_0 处理最高(54.44%)。综上所述,干物质积累量受水氮处理的影响显著,其在不同器官中的分配比例变幅较小,推测可能受基因型的影响更大。

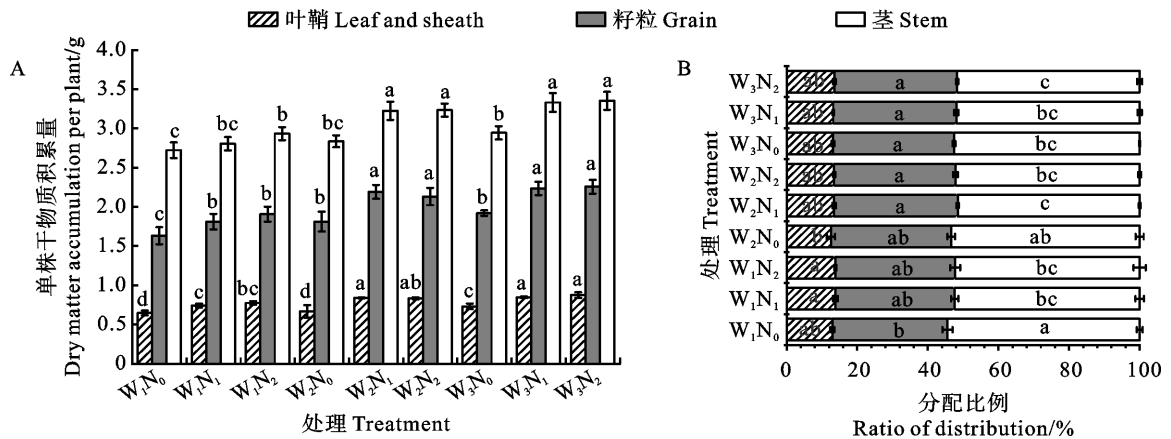


图 4 不同水氮处理对干物质积累(A)及分配(B)的影响

Fig. 4 Effects of different water and nitrogen treatments on dry matter accumulation(A) and distribution(B)

2.4 不同水氮处理对冬小麦株高、穗长及籽粒产量的影响

由表 2 可以看出,滴灌量和施氮量及其互作对株高、穗长和产量有不同程度的影响。不同水氮处理下,株高范围在 84.10~99.37 cm,穗长范围在 9.54~9.78 cm, W_3N_2 处理的株高和穗长较 W_1N_0 处理显著增加($P<0.05$),增幅分别为 18.16%和 2.52%。同一滴灌量条件下,随着施氮量的增加,产量呈增加趋势,其中 W_1N_2 处理较 W_1N_0 处理产量显著增加(9.87%), W_2N_2 处理较 W_2N_0 处理产量显著增加(24.38%), W_3N_2 处理较 W_3N_0 处理产量显著增加(21.41%);施氮量间比较, N_2 处理下平均产量最高,达 7 875.04 $kg \cdot hm^{-2}$,较 N_0 处理显著提高(18.74%)。同时增加滴灌量和施氮量, W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_3N_1 和 W_3N_2 处理产量显著高于 W_1N_0 、 W_1N_1 、 W_1N_2 、 W_2N_0 和 W_3N_0 处理,其中产量最高的水氮组合 W_2N_2 处理(8 395.88 $kg \cdot hm^{-2}$)较 W_1N_0 处理(6 333.37 $kg \cdot hm^{-2}$)增加 24.57%。以上结果表明,增大滴灌量和施氮量能显著增加株高和产量,穗长受滴灌量影响较小,滴灌量和施氮量及其互作均对小麦产量有显著效应。

表 2 不同水氮处理下的株高、穗长及产量

Table 2 Plant height, panicle length and yield under different water and nitrogen treatments

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	穗长 Spike length/cm	产量 Yield/ ($kg \cdot hm^{-2}$)
W_1N_0	84.10c	9.54b	6 333.37d
W_1N_1	89.11b	9.58b	6 604.20cd
W_1N_2	91.67b	9.62ab	6 958.37b
W_2N_0	89.09bc	9.55b	6 750.03bc
W_2N_1	97.83a	9.70ab	8 208.37a
W_2N_2	99.67a	9.70ab	8 395.88a
W_3N_0	89.56b	9.55b	6 812.53bc
W_3N_1	99.34a	9.75a	8 250.04a
W_3N_2	99.37a	9.78a	8 270.87a
F 值 F value			
W	20.14**	3.23	125.07**
N	26.74**	6.86**	127.57**
W×N	0.62	0.70	12.39**

W:灌水量;N:施氮量;同列数据后不同字母表示不同处理间差异在 0.05 水平显著;*: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。下同。

W: Irrigation amount; N: Nitrogen rate; Different letters following data in same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; The same in table 3.

2.5 不同水氮处理对冬小麦水氮利用效率的影响

由表 3 可知,滴灌量和施氮量及其互作对灌溉水利用效率、降水利用效率等指标的影响均极显著($P<0.01$)。随着滴灌量的增加,灌溉水利用效率呈先升高后降低的趋势(N_0 除外), W_2N_0 和 W_3N_0 处理显著低于其他处理, W_2N_2 和 W_2N_1 处理较高,且显著高于 W_3N_2 、 W_3N_1 处理,分别增加 12.30%、13.82%。 W_2N_2 处理降水利用效率最高,达 $33.66\text{ kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$,随后依次为 W_3N_2 、 W_3N_1 和 W_2N_1 处理,较降水利用效率最低的处理(W_1N_0)增幅分别为 32.57%、

30.60%、30.29%和 29.62%。
氮肥农学利用率表现为 W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_3N_1 和 W_3N_2 处理显著高于 W_1N_1 和 W_1N_2 处理,氮肥偏生产力表现为 W_2N_1 和 W_3N_1 处理显著高于 W_1N_1 、 W_1N_2 、 W_2N_2 和 W_3N_2 处理。在相同滴灌量条件下,除 W_1 处理下的氮肥农学利用率随着施氮量的增加而增加外,其余处理的氮肥农学利用率和氮肥偏生产力均随着施氮量的增加而降低。同一施氮量中, W_1 较 W_2 处理显著增加氮肥农学效应、氮肥偏生产力, W_2 与 W_3 处理间氮肥农学效应、氮肥偏生产力差异不显著。

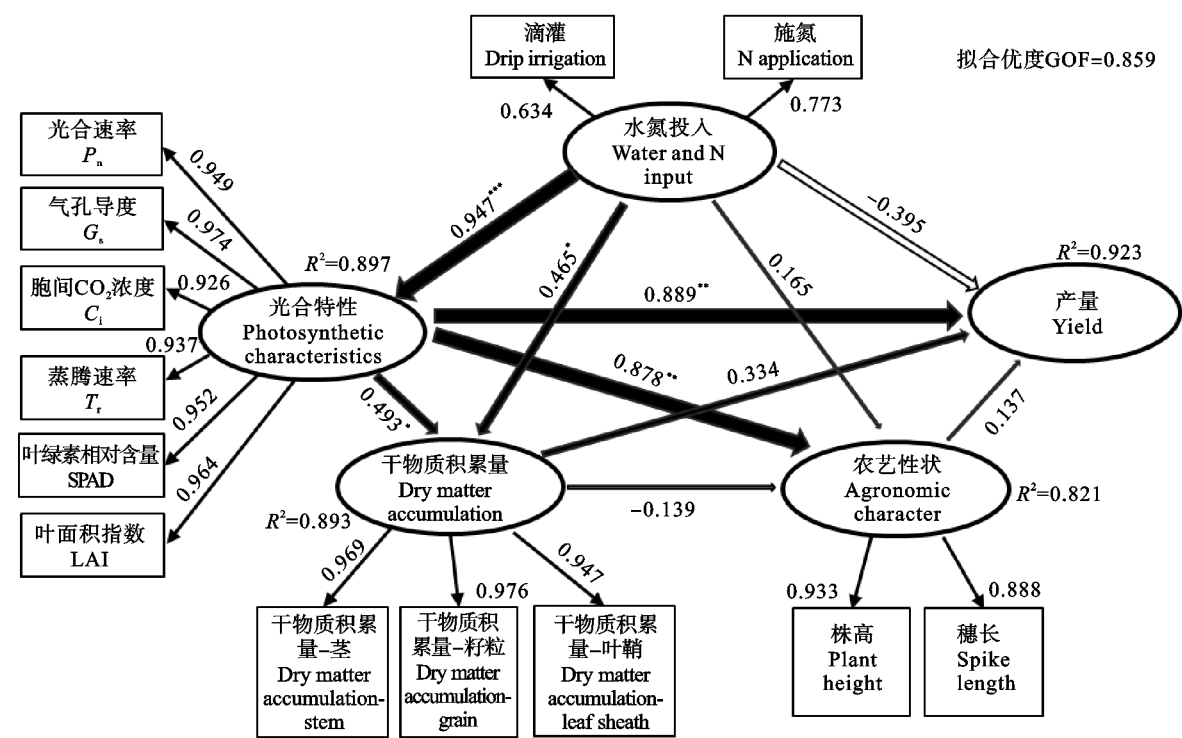
表 3 不同处理下的冬小麦水氮利用效率
Table 3 Water nitrogen utilization efficiency of winter wheat under different treatments

处理	总灌水量 Total irrigation/ ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	降水利用效率 Precipitation use efficiency/ ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$)	氮肥农学利用率 Agronomic nitrogen use efficiency/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	氮肥偏生产力 Nitrogen partial productivity/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
W_1N_0	5 250	1.21d	25.39d	/	/
W_1N_1	5 250	1.26c	26.48cd	1.13b	27.52b
W_1N_2	5 250	1.33b	27.90b	2.08b	23.19c
W_2N_0	6 000	1.13e	27.06bc	/	/
W_2N_1	6 000	1.37ab	32.91a	6.08a	34.20a
W_2N_2	6 000	1.40a	33.66a	5.49a	27.99b
W_3N_0	6 750	1.01f	27.31bc	/	/
W_3N_1	6 750	1.22cd	33.08 a	5.99a	34.38a
W_3N_2	6 750	1.23cd	33.16 a	4.86a	27.57b
F 值	W	59.20**	125.25**	52.35**	170.47**
F value	N	121.68**	127.75**	134.01**	10 400.76**
	W×N	10.16**	12.41**	15.23**	47.62**

2.6 小麦产量对水氮投入、光合特性、干物质积累和农艺性状的响应

路径分析能解释研究目标间直接或间接效应关系。由图 5 可知,本研究模型拟合优度(GOF)0.859,模型解释力较强。水氮投入、光合特性和干物质积累量均能通过直接途径或间接途径影响产量,农艺性状则通过单一路径直接影响产量。水氮投入对光合特性和干物质积累量影响显著,光合特性对农艺性状、干物质积累量和产量的影响显著。水氮投入、光合特性、干物质积累量和农艺性状对产量的直接效应值分别为-0.396、0.889、0.334 和 0.137,占对产量总效应贡献的-41.08%、92.22%、34.65%和 14.21%,水氮投入、光合特性、干物质积累量对产

量的间接效应值分别为 1.27、0.28 和-0.02,占对产量总效应贡献的 83.20%、18.04%和-1.24%(表 4),表明光合特性是影响干物质积累、农艺性状和产量的重要因子,水氮投入主要通过驱动光合特性影响产量。由外部模型可知,光合特性中所有显变量载荷均超过 0.926,其中气孔导度(0.974)和叶面积指数(0.964)载荷最高;茎、叶鞘、籽粒的干物质积累量载荷均超过 0.947,其中叶鞘干物质积累(0.976)对干物质积累量的解释力最强,表明叶鞘是干物质存储的关键器官;株高(0.933)和穗长(0.888)的载荷较高,其中穗长对农艺性状的贡献略低于株高,施氮水平(0.773)比滴灌水平(0.634)更能反映投入因素。



圆形框中的变量为潜变量,矩形框中的变量为显变量;水氮投入、光合特性、干物质积累量、农艺性状和产量之间的箭头连线表示路径指向,线条粗细表示路径系数绝对值大小,黑实线、中空线分别表示系数的正、负,连线旁的数字代表路径系数;潜变量与显变量之间的箭头指向表示该潜变量由显变量表征。*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$ 。

The variables in the circular box are latent variables, and the variables in the rectangular box are explicit variables. The arrow connection line between water and nitrogen input, photosynthetic characteristics, dry matter accumulation, agronomic traits and yield represents the path direction; Line thickness represents the absolute value of the path coefficient; Black solid line and the hollow line represent the positive and negative of the coefficient, respectively, and the number next to the line represents the path coefficient. The arrow pointing between the latent variable and the explicit variable indicates that the latent variable is represented by the explicit variable. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$.

图 5 小麦灌浆期不同因素和产量的结构方程模型分析

Fig. 5 Structural equation model analysis of different factors and yield of wheat at grain-filling stage

表 4 各变量对产量的效应分解

Table 4 Effect decomposition of each variable on yield

指标 Index	直接效应 Direct		间接效应 Indirect		总效应 Total	
	效应值 Effect value	占比 Proportion/%	效应值 Effect value	占比 Proportion/%	效应值 Effect value	占比 Proportion/%
水氮投入 Water and N input	-0.396	-41.08	1.27	83.20	0.877	35.16
光合特性 Photosynthetic characteristics	0.889	92.22	0.28	18.04	1.165	46.71
干物质积累量 Dry matter accumulation	0.334	34.65	-0.02	-1.24	0.315	12.63
农艺性状 Agronomic trait	0.137	14.21	0.00	0.00	0.137	5.49

3 讨论

3.1 水氮处理对灌浆期冬小麦 SPAD、光合参数的影响

光合作用是植物合成有机物的重要途径,其

效率决定小麦干物质积累量与产量^[13]。尤其在开花至灌浆阶段,叶片光能捕获与转化效率的协同提升,是保障籽粒充实的关键^[14]。滴灌量和施氮量是影响小麦光合作用的重要因素,充足的水氮供应有利于提高小麦生育后期光合物质生产能

力,促进小麦的生长^[15]。本研究中,开花期、花后10 d和花后20 d, W_3N_2 处理的 SPAD 值、光合参数(C_i 、 G_s 、 P_n 和 T_r)较 W_1N_0 处理均显著提高($P<0.05$),说明灌水和施氮可以有效提高叶片光合机构的活性。充足的水分供应能缓解气孔限制,为 CO_2 扩散提供通道^[16],氮素输入通过增强酶活性与电子传递效率,加速胞间 CO_2 的固定与转化,最终维持较高的净光合速率^[17]。灌水量为 $6\ 000\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 、施氮量 $240\ kg \cdot hm^{-2}$ 条件下,继续增加水氮投入对小麦开花期至花后20 d的光合特性的提升作用不大。前人研究也表明,当水氮供应达到一定阈值后,继续增加水氮投入,不能提高光合生产能力,甚至会导致植物的光合特性下降,进而影响产量^[8]。本研究在路径分析(表4,图5)中也发现,水氮投入显著影响($P<0.01$)光合特性,光合特性作为关键中介变量,介导了水氮投入对产量的正向调控。值得注意的是,水氮投入对产量的直接效应值为 -0.396 ,占直接效应对产量总效应的 -41.08% ,此负效应可能源于水氮投入超过阈值(即 W_2N_1 处理)后,无法显著增产所致。

3.2 水氮处理对冬小麦 LAI、干物质积累及转运的影响

小麦生长过程中 LAI、干物质积累及转运与籽粒产量密切相关,理想的冠层结构和干物质产量是作物获得高产的基础,通常被认为是小麦产量形成的重要因素^[18-19]。本研究结果表明,LAI在灌浆期随着小麦的生长呈逐渐降低趋势,滴灌量和施氮量可显著增加冬小麦 LAI 和干物质积累量,这与李正鹏等^[20]和唐锐等^[3]的研究结果一致。可能因为适度水氮供应能有效优化养分吸收,改善冠层结构,扩大叶面积,从而增强光合作用,促进干物质积累^[21]。本研究还发现,滴灌量由 $6\ 000\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 增加至 $6\ 750\ m^3 \cdot hm^{-2}$,施氮量由 $240\ kg \cdot hm^{-2}$ 增加 $300\ kg \cdot hm^{-2}$ 时,干物质积累量和叶面积指数增加不显著,甚至出现下降趋势。前人研究中也发现类似现象^[22],这可能因为过高的灌水量会导致土壤通气性变差,根系活力下降,反而不利于水分和养分的吸收利用;而过高的施氮量则超出了植株在该生育阶段的氮素需求与同化能力,这种过量供应破坏了养分供需平衡^[23-25]。因此,合理的水氮管理,才能高效促进光合产物的形成与积累,显著提升 LAI 和干物质积累量,为籽粒高产奠定物质基础。

3.3 水氮处理对冬小麦产量及水氮利用效率的影响

解析水、氮及其互作的调控机制是实现“以肥调水”和“以水促肥”理论的基础,也是实现小麦高产高效的有效途径^[26-27]。小麦生育后期是需水、需肥的关键期,合理的水氮运筹对于提高小麦产量及水氮利用效率具有重要意义^[28-29]。崔振坤等^[30]研究表明,黄淮海地区冬小麦的籽粒产量随着灌溉量和施氮水平的提高呈现增加趋势,在小麦拔节期和开花期将 $0\sim40\ cm$ 土层土壤相对含水量均分别补灌至 75% ,施氮量在 $180\ kg \cdot hm^{-2}$ 时获得较高的产量及较优的水氮利用效率。赫芳芳等^[31]对新疆焉耆地区滴灌春小麦的研究中发现,总灌水量 $6\ 000\ m^3 \cdot hm^{-2}$ 、总施氮量 $300\ kg \cdot hm^{-2}$ 时,茎鞘和叶片的干物质积累量、转运率表现最优。本研究基于伊犁河谷生态条件,对滴灌模式下冬小麦水氮运筹的分析结果显示, W_2N_1 (滴灌量 $6\ 000\ m^3 \cdot hm^{-2}$,施氮量 $240\ kg \cdot hm^{-2}$) 处理在协同产量与水氮利用效率上表现最优。尽管 W_2N_2 产量最高,但 W_2N_1 的氮肥偏生产力($34.20\ kg \cdot kg^{-1}$)显著高于 W_2N_2 ($27.99\ kg \cdot kg^{-1}$),表明 $240\ kg \cdot hm^{-2}$ 施氮量更符合资源高效原则。前人研究也认为,适度灌水能有效促进土壤氮素的吸收,适度施氮对土壤水分的吸收也具有协同效应,但作物的高产与高水氮利用效率仍然存在一定矛盾^[32-33]。

小麦产量受多因素综合影响,传统相关性无法综合考量多方面情况,难以明确关键驱动因子^[34]。本研究构建水氮投入、光合特性、干物质积累、农艺性状和产量的路径模型,初步探索了高产小麦适宜的水氮投入量。未来的研究可进一步纳入更多因素,如土壤养分^[3]、耕作方式^[35]等,进一步探索资源优化利用与产量的协同提升,为伊犁河谷绿色高产高效小麦生产提供更加完善的理论基础。

4 结论

W_2N_1 、 W_2N_2 、 W_3N_1 和 W_3N_2 处理维持了冬小麦灌浆期较高的 SPAD、LAI、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)和单株干物质积累量(茎、叶鞘和籽粒),提高了旗叶绿色面积持续时间,保障了光合产物的高效形成与向籽粒的转运率,获得了较高的产量。光合特性是水氮调控产量的核心途径,其直接效应值为 0.889 ,水氮投入主要通过间接

效应(1.27)驱动光合特性。为了兼顾小麦高产和水氮高效利用,伊犁河谷适宜的滴灌量为 $6\ 000\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,施氮量为 $240\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参考文献:

- [1]王冀川. 新疆小麦栽培研究与技术[M]. 北京:中国农业技术出版社,2015:11.
WANG Y C. Xinjiang wheat cultivation research and technology [M]. Beijing:China Agriculture Press,2015:11.
- [2]SHU X X, WANG Y Q, WANG Y L, *et al.* Response of soil N_2O emission and nitrogen utilization to organic matter in the wheat and maize rotation system [J]. *Scientific Reports*, 2021,11:4396.
- [3]唐锐,韩宜秀,易树生,等. 不同水氮组合对冬小麦产量及水氮利用效率的调控效应[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(10):1945.
TANG R, HAN Y X, YI S S, *et al.* Regulation effects of different water and nitrogen combinations on yield and water and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023,29(10):1945.
- [4]高翠民,杨永辉,韩伟锋,等. 水氮运筹对滴灌冬小麦产量和水氮利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2024,44(7):886.
GAO C M, YANG Y H, HAN W F, *et al.* Effect of water and nitrogen management on yield, and water and nitrogen use efficiency of winter wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024,44(7):886.
- [5]王华美,黄佛君,叶茂,等. 伊犁河谷粮食作物轮作倒茬周期模式与影响因素的探讨[J]. 中国农业资源与区划,2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20250617.1811.002.html>.
WANG H M, HUANG F J, YE M, *et al.* Discussion on the cycle pattern and influencing factors of grain crop rotation and stubble in the Yili River Valley [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20250617.1811.002.html>.
- [6]SAIN R S, SHARMA S N, SHARMA R K. The genetic control of flag leaf length in normal and late sown durum wheat [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2003, 141(3-4): 323.
- [7]李彦彬,王晓猛,高世凯,等. 不同施氮水平下旱后复水对冬小麦叶片光合特性和产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2025,43(4):405.
LI Y B, WANG X M, GAO S K, *et al.* Impact of post-drought rehydration on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat leaves under different nitrogen application levels [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2025,43(4):405.
- [8]ALI S, XU Y Y, JIA Q M, *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.
- [9]张帆,周加森,马阳,等. 水氮调控对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2021,(1):70.
ZHANG F, ZHOU J S, MA Y, *et al.* Effects of water and nitrogen regulation on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021,(1):70.
- [10]KANG J, CHU Y Y, MA G K, *et al.* Physiological mechanisms underlying reduced photosynthesis in wheat leaves grown in the field under conditions of nitrogen and water deficiency [J]. *Crop Journal*, 2023, 11(2):638.
- [11]潘敏睿,马军,王杰,等. 水肥一体化技术发展概述[J]. 中国农机化学报,2020,41(8):205.
PAN M R, MA J, WANG J, *et al.* Development of water and fertilizer integration technology [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020,41(8):205.
- [12]王海琪,王荣荣,蒋桂英,等. 施氮量对滴灌春小麦叶片光合生理性状的影响[J]. 作物学报,2023,49(1):212.
WANG H Q, WANG R R, JIANG G Y, *et al.* Effect of amount of nitrogen fertilizer applied on photosynthetic physiological characteristics of drip irrigated spring wheat leaves [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023,49(1):212.
- [13]曲文凯,徐学欣,赵金科,等. 施氮对滴灌冬小麦花后光合生理、灌浆特性及产量品质的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(5):322.
QU W K, XU X X, ZHAO J L, *et al.* Effect of nitrogen application on photosynthetic physiology grain-filling characteristics and yield and quality after anthesis of winter wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(5):327.
- [14]丛孟菲,赖宁,胡洋,等. 化肥减施对滴灌冬小麦灌浆期光合生理特性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022,(5):48.
CONG M F, LAI N, HU Y, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction on photosynthetic physiological characteristics of winter wheat at grain filling stage under drip irrigation [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022,(5):48.
- [15]徐哲莉,朱伟旗,王立涛,等. 灌水及叶面施氮对晚播小麦产量、品质及光合特性的影响[J]. 作物杂志,2024,(2):145.
XU Z L, ZHU W Q, WANG L T, *et al.* Effects of irrigation and foliar nitrogen application on yield, quality and photosynthetic characteristics of late sowing wheat [J]. *Crops*, 2024,(2):145.
- [16]武海霞,郭丽丽,郝立华,等. 水分和 CO_2 浓度对冬小麦气孔特征、气体交换参数和生物量的影响[J]. 作物学报,2018,44(10):1571.
WU H X, GUO L L, HAO L H, *et al.* Effects of water and CO_2 concentration on stomatal traits, leaf gas exchange, and biomass of winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018,44(10):1571.

- [17]张绪成,于显枫,马一凡.施氮和大气CO₂浓度升高对小麦旗叶光合电子传递和分配的影响[J].应用生态学报,2011,22(3):673.
- ZHANG X C, YU X F, MA Y F. Effects of nitrogen application and elevated atmospheric CO₂ on electron transport and energy partitioning in flag leaf photosynthesis of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 673.
- [18]SHI X L, SHI W J, DAI N, *et al.* Optimal irrigation under the constraint of water resources for winter wheat in the North China Plain [J]. *Agriculture*, 2022, 12(12): 2057.
- [19]郑天翔,程红玉,郭增鹏,等.减量施氮对河西灌区春小麦光合特性及产量的影响[J].甘肃农业大学学报,2024,59(1):100.
- ZHENG T X, CHENG H Y, GUO Z P, *et al.* Effects of reduced nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield of spring wheat in Hexi irrigation area [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(1): 100.
- [20]李正鹏,宋明丹,冯浩.水氮耦合下冬小麦LAI与株高的动态特征及其与产量的关系[J].农业工程学报,2017,33(4):200.
- LI Z P, SONG M D, FENG H. Dynamic characteristics of leaf area index and plant height of winter wheat influenced by irrigation and nitrogen coupling and their relationships with yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(4): 200.
- [21]JHA S K, GAO Y, LIU H, *et al.* Root development and water uptake in winter wheat under different irrigation methods and scheduling for North China [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 182: 139.
- [22]宋明丹,李正鹏,冯浩.不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J].农业工程学报,2016,32(2):123.
- SONG M D, LI Z P, FENG H. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 123.
- [23]吴强,张永平,董玉新,等.施氮量和灌水模式对小麦产量、品质和氮肥利用的影响[J].麦类作物学报,2020,40(3):339.
- WU Q, ZHANG Y P, DONG Y X, *et al.* Effect of nitrogen application rates and irrigation modes on yield, nitrogen use efficiency and quality in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(3): 339.
- [24]TORRION J A, STOUGAARD R N. Impacts and limits of irrigation water management on wheat yield and quality [J]. *Crop Science*, 2017, 57(6): 3239.
- [25]TARI A F. The effects of different deficit irrigation strategies on yield, quality, and water-use efficiencies of wheat under semi-arid conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 167: 1.
- [26]刘颖,顾昀怿,张伟杨,等.水分与氮素及其互作调控小麦产量和水氮利用效率研究进展[J].作物杂志,2023,(4):11.
- LIU Y, GU Y Y, ZHANG W Y, *et al.* Research advances in the effects of water and nitrogen and their interaction on the grain yield, water and nitrogen use efficiencies of wheat [J]. *Crops*, 2023, (4): 11.
- [27]SINCLAIR T R, RUFTY T W. Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics [J]. *Global Food Security*, 2012, 1(2): 94.
- [28]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):169.
- HUANG L, YANG W P, HU X Q, *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): 169.
- [29]张建军,唐小明,党翼.灌水量及其分配方式对冬小麦水分利用效率、光合特性和产量的影响[J].麦类作物学报,2008,28(1):85.
- ZHANG J J, TANG X M, DANG Y. Effects of irrigation quantity and irrigation ways on water use efficiency photosynthetic characters and yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(1): 85.
- [30]崔振坤,于振文,石玉,等.水氮运筹对小麦光合物质生产和产量的影响[J].应用生态学报,2024,35,(6):1564.
- CUI Z K, YU Z W, SHI Y, *et al.* Effects of water and nitrogen management on photosynthetic matter production and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35, (6): 1564.
- [31]赫芳芳,杨龙龙,蒋桂英,等.水氮互作对春小麦干物质积累、转运与灌浆特性的影响[J].干旱地区农业研究,2024,42(6):93.
- HE F F, YANG L L, JIANG G Y, *et al.* Effects of water-nitrogen interaction on dry matter accumulation, transport and grain filling characteristics of spring wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(6): 93.
- [32]PÉREZ-BLANCO C D, HRAST-ESSENFELDER A, PERRY C. Irrigation technology and water conservation: A review of the theory and evidence [J]. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2020, 14(2): 216.
- [33]GUO Z J, ZHANG Y L, ZHAO J Y, *et al.* Nitrogen use by winter wheat and changes in soil nitrate nitrogen levels with supplemental irrigation based on measurement of moisture content in various soil layers [J]. *Field Crops Research*, 2014, 164: 117.
- [34]陈久月,沈健,王杨,等.小麦新品种(系)产量及其与主要产量性状的相关性[J].西北农业学报,2015,24(01):51.
- CHEN J Y, SHEN J, WANG Y, *et al.* Correlations between yield and main yield related traits of new developed wheat varieties (lines) [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2015, 24(01): 51.
- [35]HOON K J, HO J D. Extraction of wheat cultivation area using multitemporal satellite images and correlation analysis between wheat yield and climate data [J]. *Journal of Climate Research*, 2019, 14(2): 95.