

# 水氮互作对春小麦干物质积累、 转运与灌浆特性的影响

赫芳芳<sup>1</sup>, 杨龙龙<sup>1</sup>, 蒋桂英<sup>1</sup>, 郭柔谷<sup>1</sup>, 雷琪琪<sup>1</sup>, 徐红军<sup>2</sup>

(1.石河子大学农学院,新疆 石河子 832000; 2.新疆农垦科学院作物研究所,新疆 石河子 832000)

**摘要:**为探究焉耆地区高产滴灌春小麦干物质积累、转运与灌浆特性及其对水氮互作的响应机制,明确该地区滴灌春小麦的水氮施用量,以‘新春38号’和‘新春45号’春小麦为试验材料,采用裂区设计,设置灌溉处理为主区,包括亏缺灌溉( $W_1, 4\ 500\ m^3 \cdot hm^{-2}$ )和适宜灌溉( $W_2, 6\ 000\ m^3 \cdot hm^{-2}$ );施氮处理为副区,包括0( $N_0$ ),  $300\ kg \cdot hm^{-2}$ ( $N_1$ ),  $400\ kg \cdot hm^{-2}$ ( $N_2$ ),比较分析高产滴灌春小麦花后叶片和茎鞘的干物质积累与籽粒灌浆特性。结果表明:随施氮量增加,两品种茎鞘和叶片的干物质积累量、转移量、转移率和粒重均先增加后降低,并均以 $W_2N_1$ 处理最佳,贡献率则以 $W_1N_1$ 处理最佳。两品种快速增长期结束时间( $t_2$ )、快速增长期持续时间( $t_2-t_1$ )、平均灌浆速率( $V_{mean}$ )、最大灌浆速率( $V_{max}$ )均随施氮量的增加呈先增加后降低,而快速增长期时间( $t_1$ )为先降低后增加,最大灌浆速率时间( $t_{max}$ )则持续下降。相关性分析表明,茎鞘、叶片的转移量、转移率、贡献率、 $t_2$ 、 $t_2-t_1$ 、 $V_{max}$ 、 $V_{mean}$ 与粒重存在显著正相关关系,且两品种的粒重与平均灌浆速率的直接通径系数分别为0.5354和0.5173,与灌浆持续时间的直接通径系数为0.6752和0.6249,表明灌浆持续时间对粒重的影响程度大于平均灌浆速率。在焉耆地区滴灌春小麦生产中,以 $W_2N_1$ 处理(灌水 $6\ 000\ m^3 \cdot hm^{-2}$ +施氮 $300\ kg \cdot hm^{-2}$ )茎鞘和叶片的干物质积累量、转运率表现最佳,故推荐其为焉耆地区合理的水氮供给模式。

**关键词:**滴灌春小麦;水氮互作;干物质积累转运;灌浆特性;粒重

**中图分类号:**S512.1 **文献标志码:**A

## Effects of water-nitrogen interaction on dry matter accumulation, transport and grain filling characteristics of spring wheat

HE Fangfang<sup>1</sup>, YANG Longlong<sup>1</sup>, JIANG Guiying<sup>1</sup>, GUO Rougu<sup>1</sup>, LEI Qiqi<sup>1</sup>, XU Hongjun<sup>2</sup>

(1. College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

(2. Crop Research Institute, Xinjiang Agricultural Reclamation Academy, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** In order to explore the dry matter accumulation, transport and grain filling characteristics of high-yield drip irrigated spring wheat in Yanqi area and its response mechanism to water and nitrogen interaction and clarify the water and nitrogen application rate of drip irrigated spring wheat in this area, ‘Xinchun 38’ and ‘Xinchun 45’ spring wheats were used as experimental materials. The split-zone design was employed, with the main irrigation treatments including deficit irrigation ( $W_1: 4\ 500\ m^3 \cdot hm^{-2}$ ) and optimal irrigation ( $W_2: 6\ 000\ m^3 \cdot hm^{-2}$ ). Nitrogen application served as the secondary treatment, with levels of 0 ( $N_0$ ),  $300\ kg \cdot hm^{-2}$ ( $N_1$ ), and  $400\ kg \cdot hm^{-2}$ ( $N_2$ ). The dry matter accumulation and grain filling characteristics of leaves and stem sheaths in high-yield drip-irrigated spring wheat after flowering were compared and analyzed. The results showed that with the increase of nitrogen application rate, the dry matter accumulation, transfer amount, transfer rate and grain weight of stem sheath and leaf of the two varieties increased first and then decreased, and all of them were treated with  $W_2N_1$  as the best, and the contribution rate was the best with  $W_1N_1$ . The end time of the rapid growth period ( $t_2$ ), the duration of the rapid growth period ( $t_2-t_1$ ), the average grain filling rate ( $V_{mean}$ ) and the maximum grain filling

收稿日期:2024-04-16

修回日期:2024-05-23

基金项目:新疆重点产业创新发展支撑计划项目(2021DB010)

作者简介:赫芳芳(2000-),女,新疆阿拉尔人,硕士研究生,研究方向为小麦高产栽培。E-mail:2749281562@qq.com

通信作者:蒋桂英(1967-),女,山东梁山人,教授,主要从事小麦高产栽培研究。E-mail:jgy67@126.com

徐红军(1969-),男,新疆阿克苏人,研究员,主要从事小麦高产栽培研究。E-mail:xhj288@163.com

rate ( $V_{\max}$ ) of the two varieties increased first and then decreased with the increase of nitrogen application rate, while the time of the rapid growth period ( $t_1$ ) decreased first and then increased, and the maximum grain filling rate time ( $t_{\max}$ ) continued to decrease. Correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between stem sheath and leaf transfer amount, transfer rate, contribution rate,  $t_2$ ,  $t_2-t_1$ ,  $V_{\max}$  and  $V_{\text{mean}}$  and grain weight, and the direct diameter coefficients between grain weight and average filling rate were 0.5354 and 0.5173, respectively, and 0.6752 and 0.6249, respectively, indicating that the effect of grain filling duration on grain weight was greater than that of average grain filling rate. In the production of drip irrigation spring wheat in Yanqi area, the dry matter accumulation and transport rate of stem sheaths and leaf treated of  $W_2N_1$  (irrigation  $6\ 000\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  + nitrogen application  $300\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) were the best, so it is recommended as a reasonable water and nitrogen supply mode in Yanqi area.

**Keywords:** drip-irrigated spring wheat; water-nitrogen interaction; dry matter accumulation and transport; grain filling characteristic; grain weight

水氮是影响作物产量形成的关键因素,合理的灌水量和施氮量是提高作物产量的重要技术途径<sup>[1]</sup>。粒重是决定作物产量的最后一个环节,对产量形成具有重要贡献<sup>[2]</sup>。小麦籽粒灌浆过程是一个复杂且有序的生物学过程,其籽粒灌浆物质主要来源于两部分:一部分源自花前营养器官中储存的光合同化物转移到籽粒中,用于穗器官的构造;另一部分源自花后同化物的积累,用于籽粒的灌浆过程<sup>[3-4]</sup>。开花到成熟期间作物的光合能力以及花后干物质的转运能力对籽粒产量影响显著<sup>[5]</sup>。随灌水量的增加,干物质积累量显著提高<sup>[6]</sup>,同时促进生育后期干物质在籽粒中的转运。适量增施氮肥同样可提高干物质积累量,尤其提高了干物质积累的平均速率和最大速率,使得粒重增加<sup>[7]</sup>。在籽粒灌浆过程中,灌浆速率和灌浆持续时间是两个重要参数<sup>[8-9]</sup>。适宜的灌浆速率以及灌浆持续时间有利于更高效地运用同化的碳和氮<sup>[10]</sup>。遗传因素对灌浆速率的影响较大<sup>[11]</sup>,而环境因素可调控灌浆持续时间,前人研究认为粒重与籽粒灌浆速率呈正相关关系,与后者无显著关系<sup>[12]</sup>;但也有研究指出粒重由灌浆持续时间和灌浆速率二者共同决定<sup>[13]</sup>,灌浆速率对粒重的影响相较于灌浆持续时间更大<sup>[14]</sup>。可见,前人对此研究结论并不一致。水分胁迫会导致小穗退化不孕<sup>[15]</sup>,影响作物对氮素的吸收、转运和同化效率,从而减少了籽粒的氮素积累,进而影响籽粒灌浆进程<sup>[16]</sup>。吕广德等<sup>[17]</sup>研究表明水分过多则会显著影响小麦干物质向籽粒转移,降低粒重。牛巧龙等<sup>[18]</sup>发现适宜的施氮量可显著延长灌浆持续时间,促进籽粒干物质积累、花后营养器官贮存的同化物向籽粒转运增加粒重。过量施氮不但无法提高粒重,反而会降低花后同化物的积累以及贡献率,对籽粒灌浆造成影响<sup>[19]</sup>。

已有研究多数集中于水氮单一因素对小麦干物质积累与转运特性的影响,而在新疆关于水氮互作对春小麦影响的研究较少,特别是缺乏籽粒不同时段灌浆参数与粒重关系的系统研究。焉耆地区是新疆春小麦的高产区,正常年份该区春小麦单产可达  $9\ 000 \sim 10\ 500\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[20]</sup>,其高产稳产对保障区域粮食安全具有重要意义。该地区整体上干旱少雨,且小麦各生育阶段的有效降水量分配不均衡,因而滴灌是其小麦生产发展的方向。焉耆地区小麦种植仍遵循传统大水大肥的生产理念,导致水氮投入过量、利用效率低,植麦效益不稳定,影响着小麦的高效生产<sup>[21]</sup>。因此,本试验从水氮互作的角度,研究花后叶、茎鞘的干物质积累与转运及籽粒的灌浆特性,揭示灌浆速率与灌浆持续时间对粒重的调控机制,为进一步优化焉耆地区春小麦水氮管理方案提供理论与技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2023 年 3—7 月在焉耆盆地 21 团 8 连进行。焉耆盆地多年均气温  $8.5\ ^\circ\text{C}$ ,日平均气温  $\geq 10\ ^\circ\text{C}$  的活动积温达  $3\ 511\ ^\circ\text{C}$ ,平均无霜期 185 d,极端最高气温为  $38.8\ ^\circ\text{C}$ ,最热月平均气温  $23.2\ ^\circ\text{C}$ ,极端最低气温为  $-30.7\ ^\circ\text{C}$ ,最冷月平均气温  $-11.2\ ^\circ\text{C}$ ,年平均气温日较差  $14.8\ ^\circ\text{C}$ ,年日照时数 2 980 h,年平均降水量、蒸发量、相对湿度分别为  $79.8\ \text{mm}$ 、 $1\ 876.7\ \text{mm}$ 、57%,为典型的大陆性气候。试验地以潮土、盐化潮土为主,0~40 cm 土层土壤有机质  $17.7\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮、有效磷、速效钾、有效锌含量分别为  $69.0$ 、 $17.5$ 、 $128.0$ 、 $1.2\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 值为 7.9,小麦生育期间气温和降水情况见图 1。

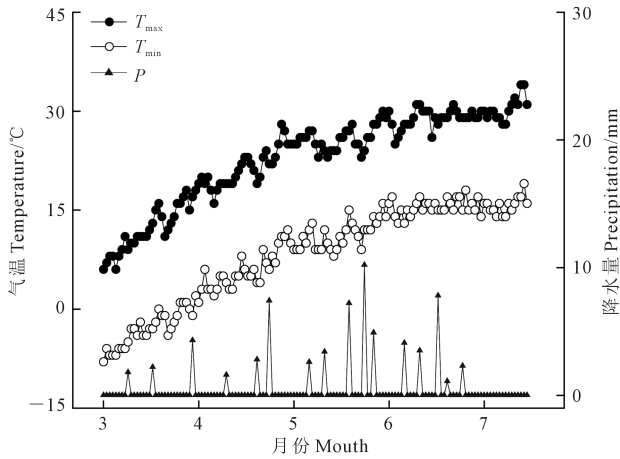


图1 小麦生育期平均日最高气温( $T_{\max}$ )、平均日最低气温( $T_{\min}$ )和逐日降水量( $P$ )变化

Fig.1 Changes in mean daily maximum temperature ( $T_{\max}$ ), mean daily minimum temperature ( $T_{\min}$ ) and daily precipitation ( $P$ ) during wheat growth period

## 1.2 试验设计

试验采用裂区设计,选择‘新春38号’(XC38)和‘新春45号’(XC45)春小麦作为供试材料;滴水量为主区,设亏缺灌溉( $W_1, 4\ 500\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )和适宜灌溉( $W_2, 6\ 000\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ );施氮量为副区,设0( $N_0$ )、300  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ( $N_1$ )、400  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ( $N_2$ ),共12个处理,各处理3次重复,小区面积为40  $\text{m}^2$ (20  $\text{m} \times 2\ \text{m}$ )。小麦生育期灌水时间及灌水量占比为:两叶一心、分蘖期均为10%,拔节、孕穗、扬花、乳熟期均为20%;追氮肥时间及施氮量占比为:两叶一心、分蘖期均为10%,拔节期为40%,孕穗期为20%,扬花期为15%,乳熟期为5%。

相同灌水量处理设置在同一区域以便于灌水,各小区不同灌水量处理之间则采用防渗膜隔开,避免水肥流失相互影响。氮肥的基肥和追肥分别设置为30%和70%,30%的氮肥(尿素,含N46%)和120  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的 $\text{P}_2\text{O}_5$ (过磷酸钙,含 $\text{P}_2\text{O}_5$ 12%)在播种前施入土壤。小麦生育期灌水、施尿素均为6次,灌水时用水表控制流量。4月4日播种,播种量为375  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,采用一机六管、一管四行的播种方式:播幅3.6 m,播24行小麦,平均行距15 cm,滴灌带管径16 mm,滴头距离30 cm,流量2.6  $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ ;7月6日收割。其他田间管理同该区大田生产保持一致。

## 1.3 观测项目与方法

1.3.1 花后干物质积累 花期期间,选择长势一致且能代表整体小区长势的10株小麦进行标记。花后每7天取样一次,直至成熟。

每次从各小区内选取10株小麦,封入冰袋保存

后带回;将其分解成茎鞘、叶片和穗三个部分,置于105℃烘箱杀青30 min,随后在75℃下烘干至恒重。干物质积累量、花后干物质转移率、花后贡献率的计算方法参照Masoni等<sup>[22]</sup>研究。

1.3.2 籽粒灌浆特性 于花后每7天为间隔进行取样,每个处理取30个主茎穗。采取人工进行剥粒的方式,装袋后置于105℃烘箱杀青30 min,再在75℃烘干至恒重。粒重及灌浆参数的计算方法参照张永强等<sup>[23]</sup>研究。

## 1.4 数据分析

使用SPSS Statistics 26软件进行显著性分析和通径分析,采用Origin 2021中Logistic 3生长曲线进行干物质积累过程拟合、相关性分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮互作对滴灌春小麦花后干物质积累与分配的影响

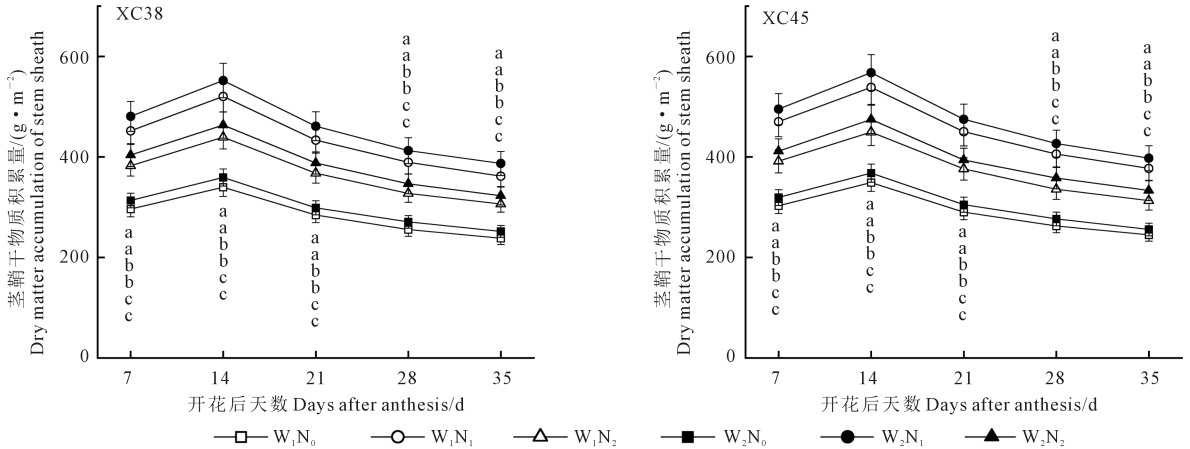
2.1.1 茎鞘干物质积累变化 两品种茎鞘干物质积累量均随着生育进程推进表现为先升高后降低趋势,于花后14 d达到峰值(图2)。随着生育进程的推进,两品种茎鞘干物质积累量在相同灌水量下,不同施氮处理间均存在显著差异( $P < 0.05$ ), $N_1$ 显著高于 $N_0$ 和 $N_2$ ,且增幅分别为51.92%~54.34%和17.97%~19.95%。相同施氮量下,不同灌溉处理间无显著差异, $W_2$ 较 $W_1$ 增幅6.00%~7.04%( $P > 0.05$ )。水氮互作下两个小麦品种各处理整体表现为 $W_2N_1 > W_1N_1 > W_2N_2 > W_1N_2 > W_2N_0 > W_1N_0$ ,且 $W_2N_1$ 处理与 $W_1N_1$ 处理的茎鞘干物质积累量无显著差异,但与其他处理均存在显著差异, $W_2N_1$ 处理的茎鞘干物质积累量较其他处理增加19.15%~62.34%。此外,灌溉、施氮对茎鞘干物质积累量的影响都达到显著水平( $P < 0.05$ ),水氮互作下则无显著差异(表1)。

2.1.2 叶片干物质积累变化 两品种小麦的叶片干物质积累量在花后7~14 d缓慢增加,在14~21 d迅速下降,之后缓慢降低(图3)。两品种在相同灌水量下,不同施氮处理间均存在显著差异, $N_1$ 叶片干物质积累量分别较 $N_0$ 和 $N_2$ 平均增加51.44%~55.93%和18.53%~21.61%。两品种在相同施氮下,不同灌溉处理间叶片干物质积累量均无显著差异, $W_2$ 较 $W_1$ 增幅为5.53%~8.30%。水氮互作下各处理叶片干物质积累量整体表现为 $W_2N_1 > W_1N_1 > W_2N_2 > W_1N_2 > W_2N_0 > W_1N_0$ ,其中 $W_2N_1$ 与 $W_1N_1$ 处理无显著差异,但与其他处理均有显著差异, $W_2N_1$ 处理的干物质积累量较其他处理显著增加20.02%~

61.90%。灌溉和施氮对叶片干物质积累量的影响达到显著水平,水氮互作下则无显著差异(表 1)。

2.1.3 营养器官干物质转移及其对粒重的贡献率 茎鞘和叶片转移量、转移率和贡献率均随施氮的增加呈先增加后降低趋势( $N_1 > N_2 > N_0$ )(表 2)。两品种在相同灌水量下,不同施氮处理间茎鞘、叶片干物质的转移量存在显著差异, $N_1$ 与 $N_2$ 相比,茎鞘和叶片转移量增幅分别为 18.58%~20.09%和 16.48%~19.4%,较 $N_0$ 处理增幅分别为 52.5%~58.0%和 50.5%~53.0%。XC38 的茎鞘转移率 $N_1$ 、 $N_2$ 与 $N_0$ 差异显著,而 XC48 茎鞘转移率存在显著差异,两品种叶片转移率差异不显著。 $N_1$ 与 $N_2$ 相比,茎鞘和叶片转移率分别增加 7%~8%和 4%~5%, $N_1$ 较 $N_0$ 增幅分别为 24.0%~25.0%和 9.5%~10.5%。茎鞘贡献率在 $W_1$ 处理下 $N_1$ 、 $N_2$ 与 $N_0$ 差异显著, $W_2$ 处理下差异显著,叶片贡献率存在显著差异。 $N_1$ 较

$N_2$ 处理茎鞘和叶片贡献率分别增加 8%~12%和 15%~16%,较 $N_0$ 处理分别增加 32.5%~36.0%和 34.0%~40.0%。相同施氮量下,不同灌溉间茎鞘、叶片的转移量、贡献率以及转移率无显著差异,其中仅 XC45 的茎鞘转移率在 $N_2$ 处理下存在差异,表现为 $W_2 > W_1$ , $W_2$ 较 $W_1$ 处理茎鞘和叶片转移量分别增加 3.12%~7.77%和 2.81%~13.58%,转移率分别增加 3.21%~4.09%和 0.76%~2.13%;茎鞘和叶片贡献率表现为 $W_1 > W_2$ ,且 $W_1$ 较 $W_2$ 分别增加 1.99%~6.02%和 1.55%~6.38%。水氮互作处理下,茎鞘和叶片的转移量、转移率表现为 $W_2N_1 > W_1N_1 > W_2N_2 > W_1N_2 > W_2N_0 > W_1N_0$ 。 $W_2N_1$ 处理较其他处理的茎鞘和叶片转移量分别增加 4.5%~65.0%和 3.5%~58.5%,转移率分别增加 4.0%~29.5%和 1.5%~11.5%,贡献率为 $W_1N_1$ 表现最好,但与 $W_2N_1$ 之间差异不显著。



注:不同小写字母表示同一年份中不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments in the same year ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 2 水氮互作对滴灌春小麦茎鞘干物质积累量的影响

Fig.2 Effects of water-nitrogen interaction on the dry matter weight of stem sheaths of spring wheat under drip irrigation

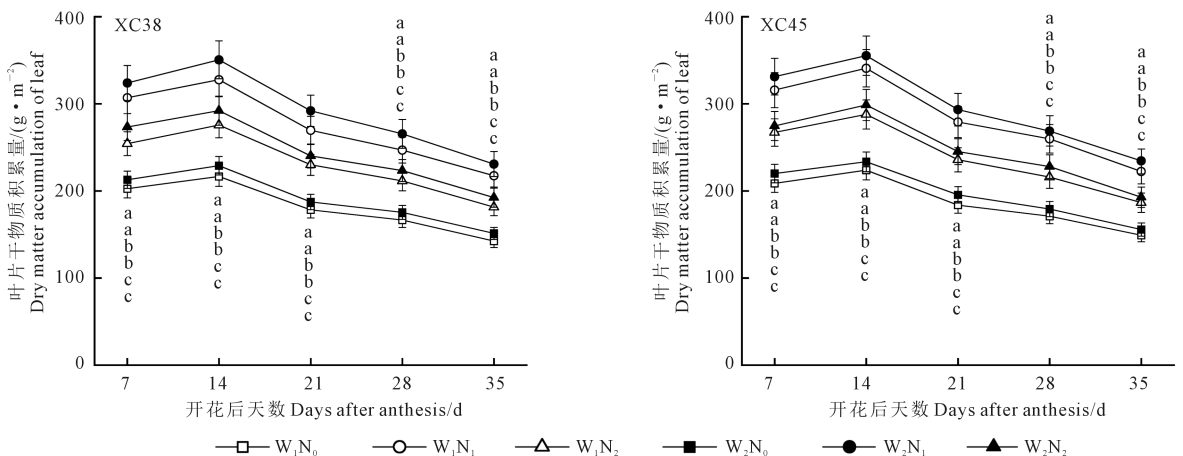


图 3 水氮互作对滴灌春小麦叶片干物质积累量的影响

Fig.3 Effects of water-nitrogen interaction on dry matter weight of spring wheat leaves under drip irrigation

灌溉对茎鞘干物质转移量达到显著水平,施氮对茎鞘、叶片干物质的转移量、转移率、贡献率都达到极显著水平。水氮互作对茎鞘和叶片干物质的转移量、转移率、贡献率均无显著差异。

表 1 水氮互作下对滴灌春小麦茎鞘、叶片干物质积累和粒重影响的方差分析

Table 1 Analysis of variance of the effects of water-nitrogen interaction on stem sheath, leaf dry material accumulation and grain weight of spring wheat under drip irrigation

因素 Factor	茎鞘干物质 Stem sheath dry matter	叶片干物质 Leaf dry matter	粒重 Grain weight
W	**	*	ns
N	**	**	**
W×N	ns	ns	ns

注:W、N 分别表示灌溉和施氮;ns 表示无显著性差异,\* 表示 0.05 水平显著,\*\* 表示 0.01 水平极显著;下同。

Note: W and N indicate irrigation and nitrogen application, respectively. ns indicates no significant difference, \* and \*\* indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 level, respectively. The same below.

## 2.2 水氮互作对滴灌春小麦籽粒灌浆参数的影响

2.2.1 粒重变化 两品种小麦的粒重在开花后持续上升,在花后 14~28 d 增长迅速、花后 28 d 后增长缓慢,并于花后 35 d 达到峰值(图 4)。相同灌水量下,不同施氮处理间均存在显著差异,N<sub>1</sub>较 N<sub>0</sub>和 N<sub>2</sub>处理粒重分别增加 44.15%~51.44%和 4.18%~7.59%。相同施氮量下,不同灌溉处理间无显著差异,W<sub>1</sub>较 W<sub>2</sub>处理粒重提高 0.16%~11.12%。水氮互作下,W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>处理与 W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>、W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>无显著差异,但与 W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>和 W<sub>2</sub>N<sub>0</sub>处理均存在显著差异,表现为 W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>>W<sub>1</sub>N<sub>1</sub>>W<sub>2</sub>N<sub>2</sub>>W<sub>1</sub>N<sub>2</sub>>W<sub>2</sub>N<sub>0</sub>>W<sub>1</sub>N<sub>0</sub>,W<sub>2</sub>N<sub>1</sub>处理粒重较其他处理增加 1.01%~64.20%。灌溉对小麦粒重无显著影响,施氮对粒重的影响达到极显著水平,水氮互作下则无显著差异(表 1)。

2.2.2 籽粒灌浆参数的变化 Logistic 模型对不同水氮处理下的小麦籽粒灌浆进程的拟合效果较好(R<sup>2</sup>>0.97)(表 3)。两品种籽粒进入快速增长长期时

表 2 水氮互作对滴灌春小麦营养器官干物质转移及其对粒重的贡献率影响  
Table 2 Effects of water nitrogen interaction on dry matter transfer in nutrient organs of drip irrigation spring wheat and its contribution to grain weight

品种 Variety	处理 Treatment	转移量 Transfer quantity/(g·m <sup>-2</sup> )		转移率 Transfer rate/%		贡献率 Contribution rate/%	
		茎鞘 Stem sheath	叶 Leaf	茎鞘 Stem sheath	叶 Leaf	茎鞘 Stem sheath	叶 Leaf
XC38	W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	57.96±0.13c	59.56±3.98c	15.13±1.18b	26.74±2.12a	8.59±0.24c	6.15±0.32d
	W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	90.16±3.81a	89.51±5.09a	18.82±0.72a	29.47±2.22a	11.47±0.40a	8.64±0.11a
	W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	75.89±1.31b	72.93±2.28b	17.58±1.01a	28.07±1.26a	10.57±0.17ab	7.48±0.14bc
	W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	61.47±2.36c	61.64±1.95c	15.60±0.97b	26.93±0.49a	8.22±0.51c	6.04±0.03d
	W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	93.63±3.29a	93.12±6.91a	19.47±0.39a	29.82±2.42a	11.25±0.04a	8.12±0.13ab
	W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	78.28±2.80b	81.07±7.18b	18.09±1.11a	28.74±0.12a	10.03±0.73b	7.02±0.34c
XC45	W <sub>1</sub> N <sub>0</sub>	58.11±3.94c	60.11±3.11c	15.38±1.35d	27.15±0.40a	8.87±0.86c	6.35±0.58d
	W <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	92.85±0.51a	93.52±3.70a	19.03±0.68ab	29.69±1.33a	11.64±0.43a	8.89±0.82a
	W <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	78.45±5.27b	80.57±4.15b	17.80±1.55c	28.39±1.58a	10.90±0.97ab	7.71±0.70bc
	W <sub>2</sub> N <sub>0</sub>	63.61±5.89c	64.30±4.79c	15.89±1.44d	27.37±2.40a	8.43±0.66c	6.27±0.48d
	W <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	97.51±8.46a	96.68±8.57a	19.93±1.94a	30.17±1.42a	11.41±0.12a	8.38±0.69ab
	W <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	80.87±0.22b	81.86±2.64b	18.45±0.12ab	28.92±0.22a	10.22±0.68b	7.26±0.24c
W		*	ns	ns	ns	ns	ns
N		**	**	**	**	**	**
W×N		ns	ns	ns	ns	ns	ns

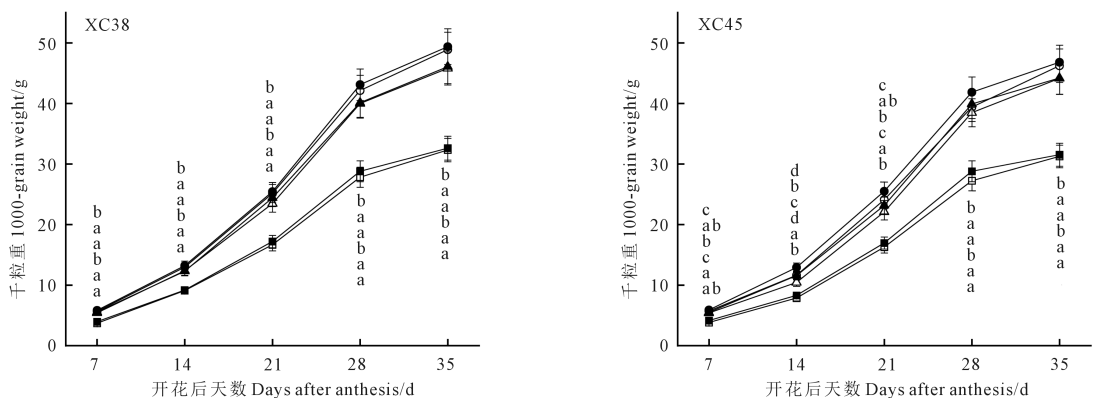


图 4 不同水氮处理对滴灌春小麦粒重的影响

Fig. 4 Effects of different water and nitrogen treatments on grain weight of spring wheat under drip irrigation

间( $t_1$ )在 14~16 d,快速增长期结束时间( $t_2$ )在 30~32 d,快速增长期持续时间( $t_2-t_1$ )在花后 15~18 d,最大灌浆速率开始时间( $t_{max}$ )在 18~20 d,平均灌浆速率( $V_{mean}$ )为 0.89~1.42 g·1000-grain<sup>-1</sup>,最大灌浆速率( $V_{max}$ )为 1.66~2.39 g·1000-grain<sup>-1</sup>。

在相同灌水量下,不同施氮下  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_{max}$  间无显著差异。 $t_2-t_1$ 、 $V_{mean}$ 、 $V_{max}$  在  $N_0$  和  $N_1$  处理下均有显著差异,且  $N_1$  较  $N_2$  处理  $t_2-t_1$ 、 $V_{mean}$ 、 $V_{max}$  增幅分别为 8%~10%、5.5%~6.0%、13.5%~18.5%,较  $N_0$  处理增幅分别为 21.0%~23.5%、48%~49%、24%~29%, $N_1$  处理下两品种在 14~16 d 提前进入快速增长期。相同施氮量下, $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_{max}$ 、 $V_{mean}$ 、 $V_{max}$  在不同灌溉处理

间无显著差异。 $t_2-t_1$  则存在显著差异,且表现为  $W_2 > W_1$ ,  $W_2$  较  $W_1$  相比  $t_2-t_1$  增幅为 14%~18%。水氮互作下,各处理的  $t_2$  与  $t_{max}$  均无显著性差异。 $W_1N_0$  的  $t_1$  较  $W_2N_1$  处理显著增加 17.8%。 $W_2N_1$  与  $W_2N_2$  处理的  $t_2-t_1$  无显著差异,与其他处理间均存在显著差异,表现为  $W_2N_1 > W_2N_2 > W_1N_1 > W_2N_0 > W_1N_2 > W_1N_0$ , 且  $W_2N_1$  较其他处理提高 9.8%~42.7%。 $V_{mean}$  整体表现为  $W_1N_1 > W_2N_1 > W_1N_2 > W_2N_2 > W_1N_0 > W_2N_0$ ,  $W_1N_1$  与  $W_1N_0$  和  $W_2N_0$  均存在显著差异,与其余处理均无显著差异,且  $W_1N_1$  较其他处理提高 4.5%~55.0%, $V_{max}$  为  $W_1N_1$  表现最好,但与  $W_2N_1$  之间差异不显著,且  $W_1N_1$  较其他处理提高 7.0%~32.5%。

表 3 不同水氮处理对滴灌春小麦籽粒灌浆参数的影响

Table 3 Effects of different water and nitrogen treatments on the grain filling parameters of drip irrigated wheat

品种 Variety	处理 Treatment	拟合方程 Fitting equation	相关系数 Correlation coefficient	$t_1/d$	$t_2/d$	$t_2-t_1/d$	$t_{max}/d$	$V_{mean}$ /(g·1000-grain <sup>-1</sup> )	$V_{max}$ /(g·1000-grain <sup>-1</sup> )
XC38	$W_1N_0$	$y = 39.66 / (1 + 30.67e^{(-0.171x)})$	0.994	16.38±0.64a	28.39±0.25a	12.01±0.99d	19.19±0.04a	0.95±0.05b	1.73±0.01b
	$W_1N_1$	$y = 50.98 / (1 + 36.67e^{(-0.169x)})$	0.983	15.25±0.13ab	30.03±1.59a	14.78±1.28bc	18.73±1.61a	1.42±0.08a	2.39±0.21a
	$W_1N_2$	$y = 48.43 / (1 + 35.14e^{(-0.170x)})$	0.987	15.99±1.54a	29.71±1.61a	13.72±0.90cd	17.67±0.86a	1.33±0.11a	1.92±0.17b
	$W_2N_0$	$y = 40.92 / (1 + 32.59e^{(-0.171x)})$	0.995	15.37±0.53ab	29.69±0.75a	14.12±0.76bc	19.22±1.62a	0.91±0.06b	1.69±0.16b
	$W_2N_1$	$y = 51.61 / (1 + 36.92e^{(-0.169x)})$	0.985	13.95±1.23b	31.06±0.80a	17.11±0.76a	18.77±0.88a	1.37±0.09a	2.21±0.19a
	$W_2N_2$	$y = 48.93 / (1 + 35.37e^{(-0.170x)})$	0.983	14.95±0.88ab	30.55±2.98a	15.60±0.24ab	18.07±0.36a	1.28±0.02a	1.88±0.11b
XC45	$W_1N_0$	$y = 38.61 / (1 + 30.21e^{(-0.171x)})$	0.985	16.25±0.59a	28.29±0.59a	12.04±0.39d	19.04±1.55a	0.93±0.05b	1.71±0.05c
	$W_1N_1$	$y = 49.16 / (1 + 35.96e^{(-0.169x)})$	0.992	14.95±0.41ab	29.88±2.10a	14.93±0.06bc	18.68±0.87a	1.37±0.12a	2.06±0.05a
	$W_1N_2$	$y = 46.41 / (1 + 34.88e^{(-0.170x)})$	0.984	15.89±0.91a	29.66±1.69a	13.77±0.54cd	17.57±0.56a	1.30±0.05a	1.83±0.15bc
	$W_2N_0$	$y = 39.08 / (1 + 30.45e^{(-0.171x)})$	0.981	15.23±0.03ab	29.44±0.80a	14.21±0.11bc	19.09±0.32a	0.89±0.01b	1.66±0.13c
	$W_2N_1$	$y = 49.87 / (1 + 36.21e^{(-0.169x)})$	0.975	13.75±0.37b	30.93±2.54a	17.18±1.09a	18.75±0.79a	1.31±0.09a	1.95±0.02ab
	$W_2N_2$	$y = 47.39 / (1 + 35.35e^{(-0.170x)})$	0.992	14.91±1.34ab	30.54±0.48a	15.63±0.57ab	17.62±0.79a	1.26±0.01a	1.79±0.17bc

注: $t_1$ 为快速增长期时间, $t_2$ 为快速增长期结束时间, $t_2-t_1$ 为快速增长期持续时间, $t_{max}$ 为最大灌浆速率开始时间, $V_{mean}$ 为平均灌浆速率, $V_{max}$ 为最大灌浆速率。

Note:  $t_1$  is the time of the rapid growth period,  $t_2$  is the end of the rapid growth period,  $t_2-t_1$  is the duration of the rapid growth period,  $t_{max}$  is the start time of the maximum grouting rate,  $V_{mean}$  is the average grouting rate, and  $V_{max}$  is the maximum grouting rate.

2.2.3 花后干物质的积累转运和灌浆参数与粒重的相关和通径分析 快速累积起始时间( $t_1$ )、达到最大灌浆速度的时间( $t_{max}$ )与粒重(G)相关性不显著,茎鞘转移量(ST)、叶片转移量(LT)、茎鞘转移率(SR)、叶片转移率(LR)、茎鞘贡献率(SC)、叶片贡献率(LC)、快速累积终止时间( $t_2$ )、快速累积持续时间( $t_2-t_1$ )、最大灌浆速率( $V_{max}$ )、平均灌浆速率( $V_{mean}$ )与粒重存在显著正相关关系(图 5)。

两品种的粒重与平均灌浆速率的直接通径系数为 0.5354 和 0.5173,平均灌浆速率与粒重存在正相关关系(表 4)。最大灌浆速率与粒重的通径系数分别为 0.1706 和 0.1659,但通过与平均速率的相互作用,它对粒重的间接影响也达到了 0.5692。粒重与灌浆持续时间的直接通径系数达到 0.6752 和

0.6249,持续灌浆时间可以显著增加粒重,与其他参数的相互作用很小,并且灌浆持续时间对粒重的影响大于平均灌浆速率。

## 3 讨论

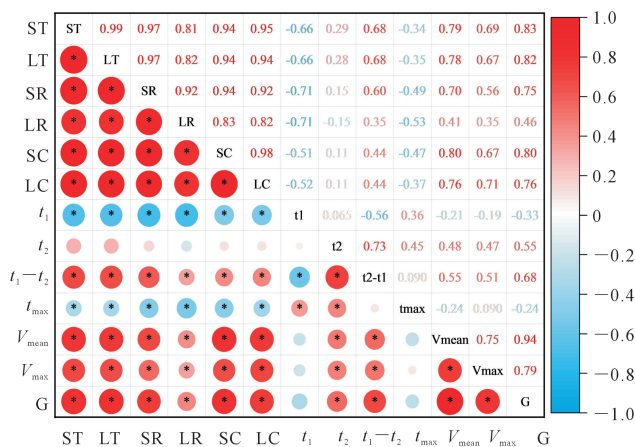
### 3.1 水氮互作对滴灌春小麦花后干物质积累与转运的影响

花前营养器官积累的干物质向籽粒转运是影响小麦产量的关键因素<sup>[24]</sup>。张金汕等<sup>[25]</sup>发现,随着施氮量增大,小麦花前茎鞘和叶片的干物质积累量、营养器官干物质转运量和转运率、植株营养器官干物质转运对籽粒的贡献率均呈先增大后减小趋势。本试验研究结果与其一致,发现两品种茎鞘、叶片的干物质量、转移量、转移率均随施氮量的

增加呈现出增加后减小趋势,表现为  $N_1 > N_2 > N_0$  和  $W_2 > W_1$ ,均以  $W_2N_1$  处理最佳。过多的施氮量会抑制小麦的生长,不利于干物质积累和向籽粒的转移<sup>[26]</sup>。在相同施氮量下,陈钰蓉等<sup>[27]</sup>发现在 380~540 mm 灌溉水平下,冬小麦花后干物质积累量对籽粒贡献率呈现随灌水量增加而增加的趋势,而本试验条件下花后干物质积累量对籽粒贡献率随着灌水量的增加而降低,研究结果与前人不同可能由于不同生态地区小麦品种对水的响应程度不同。因此,有必要进一步研究水肥一体化条件下调亏灌溉对春小麦花后干物质积累与转运的影响。

### 3.2 水氮互作对滴灌春小麦籽粒灌浆特性的影响

在产量形成过程中,灌浆期是一个重要的阶段,籽粒灌浆特性是衡量灌浆过程进行的关键因素<sup>[28]</sup>,由灌浆速率和灌浆持续时间共同决定<sup>[29]</sup>。贾峥嵘等<sup>[30]</sup>研究发现,随着施氮量的增加,最大灌浆速率与平均灌浆速率呈现先增加后降低趋势,这与本研究结果一致。Yan 等<sup>[31]</sup>研究认为,随施肥量的增加,到达最大灌浆速率的时间越晚,这与本试验结果并不一致,可能由于适量的氮肥能促进物质转化和运输,缩短了到达最大灌浆速率的时间。适当调控土壤水分含量有助于促进小麦干物质向有利



注:ST 为茎鞘转移量,LT 为叶片转移量,SR 为茎鞘转移率,LR 为叶片转移率,SC 为茎鞘贡献率,LC 为叶片贡献率,G 为粒重。 $t_1$  为快速增长期时间, $t_2$  为快速增长期结束时间, $t_2-t_1$  为快速增长期持续时间, $t_{max}$  为最大灌浆速率开始时间, $V_{mean}$  为平均灌浆速率, $V_{max}$  为最大灌浆速率。Note: ST is stem sheath transfer, LT is leaf transfer, SR is stem sheath transfer rate, LR is leaf transfer rate, SC is stem sheath contribution, LC is leaf contribution rate, G is grain weight.  $t_1$  is the time of the rapid growth period,  $t_2$  is the end of the rapid growth period,  $t_2-t_1$  is the duration of the rapid growth period,  $t_{max}$  is the start time of the maximum grouting rate,  $V_{mean}$  is the average grouting rate, and  $V_{max}$  is the maximum grouting rate.

图 5 花后干物质积累转运和灌浆参数与粒重的相关性分析  
Fig.5 Correlation analysis of dry matter accumulation transport and grouting parameters with grain weight

表 4 籽粒灌浆参数与粒重的通径系数

Table 4 Path coefficient between grain filling parameters and grain weight

品种 Variety	自变量 Independ	通径系数 Path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient		
			平均灌浆速率 Average grouting rate $X_1$	最大灌浆速率 Maximum grouting rate $X_2$	灌浆持续时间 Grouting duration $X_3$
XC38	平均灌浆速率 Average grouting rate $X_1$	0.5354		-0.0255	0.0423
	最大灌浆速率 Maximum grouting rate $X_2$	0.1706	0.5692		-0.0124
	灌浆持续时间 Grouting duration $X_3$	0.6752	0.0314	0.0113	
XC45	平均灌浆速率 Average grouting rate $X_1$	0.5173		-0.0191	0.3280
	最大灌浆速率 Maximum grouting rate $X_2$	0.1659	0.5280		-0.0965
	灌浆持续时间 Grouting duration $X_3$	0.6249	0.0294	0.0086	

的方向转移<sup>[32]</sup>;在一定干旱胁迫情况下,小麦平均灌浆时间相对缩短,而平均灌浆速率有所增加,能使籽粒干物质在短期内快速积累<sup>[33]</sup>,因此,多数研究表明在小麦整个生育期内维持充足的水分供应是不必要的<sup>[34-35]</sup>。最大灌浆速率开始时间、最大灌浆速率和平均灌浆速率均随着缺水量的增加呈先增加后降低趋势,粒重随着水分或肥料的增加呈先增加后减少趋势,适宜的缺水和适量施肥改善了籽粒灌浆,进而增加了籽粒重量<sup>[31]</sup>,这与本研究结果一致。综上所述,适宜的水分处理和合理的施氮量

有利于提高小麦产量和水氮利用效率。

## 4 结 论

水氮对‘新春 38 号’和‘新春 45 号’春小麦的茎鞘和叶片的干物质积累量、转移量、转移率以及粒重影响显著, $W_2N_1$  处理较其他处理相比,茎鞘和叶片干物质积累量分别增加 19.15%~62.34%和 20.02%~61.90%,转移量分别提高 4.5%~65.0%和 3.5%~58.5%、转移率分别提高 4.0%~29.5%和 1.5%~11.5%,平均灌浆速率提高 4.5%~55.0%,粒

重提高 1.01%~64.20%，快速累积持续时间提高 9.80%~42.71%。贡献率与最大灌浆速率为  $W_1N_1$  表现最好，但与  $W_2N_1$  之间差异不显著。此外，相关性分析表明茎鞘、叶片的转移量、转移率、贡献率、快速累积终止时间、快速累积持续时间、最大灌浆速率、平均灌浆速率与粒重存在显著正相关关系，通径分析表明灌浆持续时间大于平均灌浆速率对粒重的影响。综上所述，灌水  $6\ 000\ m^3 \cdot hm^{-2}$ +施氮  $300\ kg \cdot hm^{-2}$  ( $W_2N_1$  处理) 为该地区春小麦种植的最佳水氮组合。

### 参考文献:

- [1] 柳腾飞, 马莉, 汪顺生, 等. 不同灌溉方式下水氮供应对冬小麦水氮利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(7): 11-18.  
LIU T F, MA L, WANG S S, et al. Effects of water-nitrogen coupling under different irrigation methods on water and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(7): 11-18.
- [2] 张福彦, 范家霖, 陈晓杰, 等. 小麦粒重相关基因的遗传定位和分子标记辅助育种进展[J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(3): 507-516.  
ZHANG F Y, FAN J L, CHEN X J, et al. Genetic localization and marker assisted breeding of grain weight-related genes in common wheat[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(3): 507-516.
- [3] 马尚宇, 王艳艳, 刘雅男, 等. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 375-385.  
MA S Y, WANG Y Y, LIU Y N, et al. Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(3): 375-385.
- [4] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 施氮量对冬小麦灌浆期光合产物积累、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1027-1033.  
MA D Y, GUO T C, WANG C Y, et al. Effects of nitrogen application rates on accumulation, translocation, and partitioning of photosynthate in winter wheat at grain filling stage [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(6): 1027-1033.
- [5] WU H, XIANG J, ZHANG Y P, et al. Effects of post-anthesis nitrogen uptake and translocation on photosynthetic production and rice yield[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12891.
- [6] LIU F Y, GAO M L, ZHANG H Z, et al. Synergistic impact of various straw-return methods and irrigation regimes on winter wheat physiological growth and yield[J]. Field Crops Research, 2024, 316: 109516.
- [7] 陈伟, 孙建好, 赵建华. 甘肃省小麦施肥现状分析与评价[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 23-27.  
CHEN W, SUN J H, ZHAO J H. Analysis and evaluation of fertilization situation for wheat in Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(2): 23-27.
- [8] WIEGAND C L, CUELLAR J A. Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature[J]. Crop Science, 1981, 21(1): 95-101.
- [9] DARROCH B A, BAKER R J. Grain filling in three spring wheat genotypes: statistical analysis[J]. Crop Science, 1990, 30(3): 525-529.
- [10] TIAN G C, XIN G Z, CHRISTINE R. Source-sink interaction: a century old concept under the light of modern molecular systems biology [J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(16): 4417-4431.
- [11] GEBEYEHOU G, KNOTT D R, BAKER R J. Rate and duration of

- grain filling in durum wheat cultivars[J]. Crop Science, 1982, 22(2): 337-340.
- [12] 宋世龙, 杨卫君, 陈雨欣, 等. 氮肥减量配施生物炭对北疆灌区春小麦光合和干物质转运特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(3): 311-320.  
SONG S L, YANG W J, CHEN Y X, et al. Effect of reduced nitrogen fertilizer combined with biochar on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and distribution, and yield of spring wheat in irrigated area of northern Xinjiang[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(3): 311-320.
- [13] ISLAM D M, KHALISSA C, ALI G. Assessment of durum wheat (*Triticum durum*) genotypes on grain filling parameters[J]. The Indian Journal of Agricultural Sciences, 2023, 93(8): 833-838.
- [14] 张凯, 冯起, 王润元, 等. CO<sub>2</sub>浓度升高对春小麦灌浆特性及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 189-195.  
ZHANG K, FENG Q, WANG R Y, et al. Effects of increasing CO<sub>2</sub> concentration on grouting characteristics and yield of spring wheat[J]. China Agriculture Bulletin, 2014, 30(3): 189-195.
- [15] WANG D. Water use efficiency and optimal supplemental irrigation in a high yield wheat field [J]. Field Crops Research, 2017, 213: 213-220.
- [16] LV X K, DING Y P, LONG M, et al. Effect of foliar application of various nitrogen forms on starch accumulation and grain filling of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 645379.
- [17] 吕广德, 王超, 靳雪梅, 等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2593-2603.  
LV G D, WANG C, JIN X M, et al. Effects of water-nitrogen combination on dry matter, nitrogen accumulation and yield of winter wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2593-2603.
- [18] 牛巧龙, 曹高蕊, 万鹏, 等. 氮肥施用量对强筋和弱筋小麦干物质积累及灌浆速率的影响[J]. 天津农学院学报, 2017, 24(3): 1-5.  
NIU Q L, CAO G Y, WAN P, et al. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and grain filling rate of strong gluten and weak gluten wheat[J]. Journal of Tianjin Agricultural College, 2017, 24(3): 1-5.
- [19] 何雨桔, 刘琼, 王焜, 等. 施氮量对不同株叶型小麦旗叶光合及籽粒灌浆特性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(5): 707-713.  
HE Y J, LIU Q, WANG K, et al. Effects of nitrogen application rate on flag leaf photosynthesis and grain filling characteristics of wheat with different leaf types[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2022, 40(5): 707-713.
- [20] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.  
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [21] 李传哲, 许仙菊, 马洪波, 等. 水肥一体化技术提高水肥利用效率研究进展[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2): 469-475.  
LI C Z, XU X J, MA H B, et al. Research advances in fertigation technology improving water and fertilizer use efficiency [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2017, 33(2): 469-475.
- [22] MASONI A, ERCOLI L, MARIOTTI M, et al. Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26(3): 179-186.