

## 强筋小麦物质积累和产量形成对春季滴灌量的响应

张灵鑫<sup>1</sup>,李秉昌<sup>2</sup>,张敏<sup>1</sup>,毕经鑫<sup>1</sup>,王文政<sup>1</sup>,柳明阳<sup>1</sup>,杨敏<sup>1</sup>,蔡瑞国<sup>1</sup>

(1. 河北省作物逆境生物学重点实验室,河北科技师范学院农学与生物科技学院,河北昌黎 066004;

2. 秦皇岛市肥料与农业节水技术中心,河北秦皇岛 066000)

**摘要:**为筛选冀东地区强筋小麦春季适宜的滴灌量,选用中麦 886 和中麦 998 两个强筋小麦品种,在拔节期和开花期进行春季滴灌,设置每次灌水 0、300、450、600 和 750  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  共 5 个处理(分别用  $W_0$ 、 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  和  $W_4$  表示),比较分析了不同春季滴灌量下强筋小麦旗叶 SPAD 值、干物质积累与转运、籽粒灌浆速率、产量及其构成因素的差异。结果表明,强筋小麦花后旗叶 SPAD 值和籽粒灌浆持续时间均随滴灌量的增大而增加,干物质积累转运量和籽粒产量在 0~600  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  范围内对灌水量产生正向反应,当灌水量达到 750  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时均显著降低。水分利用效率随灌水量的增加而降低。 $W_3$  处理下,两个强筋小麦品种穗数、穗粒数、千粒重、产量均表现最优。综合考虑籽粒产量和水分利用效率,冀东地区强筋小麦拔节期和开花期滴灌量以每次 600  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  为最佳。

**关键词:** 强筋小麦;灌水量;SPAD;干物质;产量

中图分类号:S512.1;S330

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)02-0245-08

## Matter Accumulation and Yield Formation in Response to Drip Irrigation Water of Strong Gluten Wheat

ZHANG Lingxin<sup>1</sup>, LI Bingchang<sup>2</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>, BI Jingxin<sup>1</sup>,  
WANG Wenzheng<sup>1</sup>, LIU Mingyang<sup>1</sup>, YANG Min<sup>1</sup>, CAI Ruiguo<sup>1</sup>

(1. College of Agronomy and Biotechnology, Hebei Normal University of Science and Technology/ Hebei Key Laboratory of Crop Stress Biology, Changli, Hebei 066004, China; 2. Qinhuangdao Fertilizer and Agricultural Water Conservation Technology Center, Qinhuangdao, Hebei 066000, China)

**Abstract:** In order to screen the suitable irrigation amount for strong gluten wheat in the eastern Hebei region in spring, two strong gluten wheat varieties (Zhongmai 886 and Zhongmai 998) were selected as materials, with five irrigation treatments during the jointing and anthesis stages: no irrigation ( $W_0$ ), 300  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $W_1$ ) each time, 450  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $W_2$ ) each time, 600  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $W_3$ ) each time, and 750  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $W_4$ ) each time, the effects of drip irrigation on the SPAD value of flag leaves, dry matter accumulation and transportation, grain filling rate, yield, and yield components of strong gluten wheat were studied. The results showed that with the increase of drip irrigation amount, the SPAD value of flag leaves after anthesis of strong gluten wheat and the duration of grain filling increased. The accumulation and transportation of dry matter and grain yield increased in the range of 0–600  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , but significantly decreased at 750  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , while water use efficiency decreased. Under  $W_3$  treatment, the two strong gluten wheat varieties showed the best performance in terms of spike number, grain number per spike, thousand-grain weight, and yield. Taking into account both grain yield and water use efficiency, the optimal drip irrigation amount for strong gluten wheat during

收稿日期:2024-01-24

修回日期:2024-03-19

基金项目:河北省自然科学基金项目(C2022407015);秦皇岛市科学技术研究和发展计划项目(202002B007)

第一作者 E-mail: z3530914835@163.com(张灵鑫); libingchang5000@163.com(李秉昌)

通讯作者 E-mail: cairuiguo@126.com(蔡瑞国)

jointing and anthesis periods in the eastern Hebei region is  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  each time.

**Keywords:** Strong gluten wheat; Irrigation amount; SPAD; Dry matter; Yield

随着生活条件的改善,人们对强筋小麦的需求日益增大。限制强筋小麦推广的问题主要是耗水量大、产量低,且生育期内降水无法满足其生长需求<sup>[1-5]</sup>。滴灌可以高效利用水资源,将水分均匀地输送到小麦根部,提高强筋小麦产量、物质积累与转运。

不同时期灌水对小麦产量形成的影响存在差异。起身期灌水对小麦植株干物质积累和产量及其构成因素不利,但灌拔节水有助于干物质积累与转运<sup>[6-7]</sup>。小麦生育前期增加滴灌量会促进干物质积累与转运,灌浆后期增加滴灌量会导致减产<sup>[8]</sup>。在灌水量相同的情况下,仅在开花期灌 1 次水时产量可达到最佳效果<sup>[9]</sup>。优化灌水量可改善粒重比和叶重比,调控强筋小麦各器官干物质积累与转运,进而实现增产<sup>[10]</sup>。干旱、渍水均会对小麦产量、旗叶 SPAD 值产生负面影响<sup>[11-12]</sup>。小麦产量主要取决于灌浆期间光合物质合成和积累以及花前器官贮存营养物质在花后的转运。促进小麦花前干物质物质积累和转运<sup>[13-14]</sup>,同时延缓生育后期功能叶片的衰老,促进其光合作用,能达到小麦高产稳产目的<sup>[15]</sup>。因此,研究滴灌量对强筋小麦物质积累与籽粒产量形成的影响,对强筋小麦高产稳产具有重要意义。

前人研究多在传统漫灌或微喷灌条件下探讨灌水时期、灌水次数,而关于滴灌条件下,灌水量对强筋小麦物质积累、水分利用和产量形成的生理过程研究尚少。本研究以强筋小麦品种中麦 886 和中麦 998 为试验材料,在滴灌条件下,探讨春季灌水时间相同,而灌水量不同对冀东地区强筋小麦旗叶 SPAD 值、干物质积累与转运、籽粒灌浆、产量和水分利用效率的影响,以期冀东地区强筋小麦灌水提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

田间试验于 2022 年 10 月至 2023 年 6 月在河北科技师范学院农学与生物科技实验站进行。试验地为潮褐土,0~20 cm 土壤 pH 值为 6.35,有机质、全氮、速效氮、速效磷和速效钾含量分别为  $22.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $63.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $31.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $76.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。图 1

为试验点小麦生育时期的月降雨量。

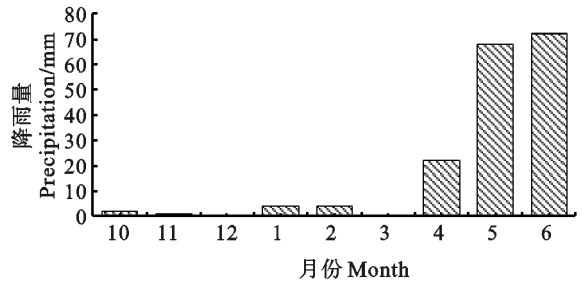


图 1 2022—2023 年小麦生育期各月份降雨情况

Fig. 1 Monthly precipitation of wheat growth period from 2022 to 2023

供试材料为强筋小麦中麦 886 和中麦 998,试验采用裂区设计,滴灌量为主区,品种为副区。在拔节期和开花期进行春季滴灌,设置每次灌水 0、300、450、600 和  $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  共 5 个处理(分别用  $W_0$ 、 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  和  $W_4$  表示),用水表控制水量。小区面积  $7.5 \text{ m}^2$  ( $3 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ ),每处理 3 次重复。强筋小麦于 2022 年 10 月 18 日适墒播种,行距 20 cm。三叶期定苗  $400 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。年前统一灌越冬水,灌水量为  $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不同滴灌量处理间种植 2 m 宽保护行进行隔离。所施氮肥、磷肥、钾肥分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含  $\text{P}_2\text{O}_5$  18%)、硫酸钾(含  $\text{K}_2\text{O}$  51%),其中一次性基施  $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{K}_2\text{O}$  均为  $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;施氮量为  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,底肥和拔节期追肥各占 50%。其他田间管理措施同当地丰产大田,2023 年 6 月 18 日收获。

### 1.2 测定项目与方法

#### 1.2.1 旗叶叶绿素相对含量(SPAD)的测定

在小麦花后 5、10、15、20、25 和 30 d 于各小区随机选择 10 片旗叶,使用 SPAD-502 叶绿素仪测定旗叶上、中、下部位,取平均值作为该叶片的 SPAD 值<sup>[16]</sup>。

#### 1.2.2 籽粒灌浆速率的测定

参照刘希伟等<sup>[17]</sup>的方法,分别于花后 5、10、15、20、25、30 和 35 d 采集开花期标记的长势一致的麦穗 50 个,于  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  杀青 30 min,  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干至恒重,手工脱粒,测粒重和粒数,换算成千粒重。以花后天数为  $x$ ,千粒重为  $y$ , $a$  表示最大粒重, $b$ 、 $c$  均为回归参数,通过 Logistic 方程  $y = a / (1 + be^{-cx})$  拟合小麦籽粒的灌浆过程。

1.2.3 干物质积累的测定

参照李雪萌等<sup>[16]</sup>的方法,分别于开花期、花后 5、10、15、20、25、30 和 35 d 取小麦 20 个单茎,分茎鞘、叶片、颖壳+穗轴、籽粒等 4 部分,于 105 °C 杀青 30 min,70 °C 烘干至恒重,称干重后计算干物质积累量、转运量、转运效率及其对籽粒产量的贡献率,每处理 3 次重复。

花前干物质转运量 = 开花期植株干重 - 成熟期植株(不含籽粒)干重

花前干物质转运效率 = 花前干物质转运量 ÷ 开花期植株干重 × 100%

花后干物质积累量 = 成熟期植株干物质积累量 - 开花期植株干物质积累量

花前干物质对籽粒产量的贡献率 = 花前干物质转运量 ÷ 成熟期籽粒干重 × 100%

花后干物质对籽粒贡献率 = 花后干物质积累量 ÷ 成熟期籽粒干重 × 100%

1.2.4 水分利用效率的测定

参照李翠平等<sup>[10]</sup>的方法,用德国 IMKO HD 2 便携式土壤水分测定仪测定不同时期 0~20 cm、20~40 cm 两层土壤水分含量。试验田降水采用集雨器统计,并计算生育期耗水量(ET)和水分利用效率(WUE)。

$$ET = \sum H(\beta_i - \beta_j) + M + P_r + K$$

$$WUE = \text{籽粒产量} \div ET$$

式中, $H$  为土层厚度(mm); $\beta_i$  和  $\beta_j$  分别代表相邻两次生育期测定的土壤体积含水量(%); $M$  为该生育期内的灌水量(mm); $P_r$  为有效降雨

量(mm); $K$  为该生育期内的地下水补给量(mm)。地下水埋深>4 m, $K$  计为 0。

1.2.5 产量及其构成因素的测定

小麦成熟后于每个小区选代表性样点 1 m<sup>2</sup> 调查有效穗数;随机连续抓取 30 个麦穗,调查穗粒数;小区收获后,籽粒晒干并测千粒重和产量。

1.2.6 数据统计分析和作图

采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 处理数据,Origin 2021 作图,采用 LSD 法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 滴灌量对强筋小麦旗叶 SPAD 值的影响

花后 5~20 d 两个品种旗叶 SPAD 值变化比较平稳,且不同处理间差异比较小,在花后 20 d 之后各处理均逐渐下降,且处理间差异逐渐增大,滴灌处理均高于 W<sub>0</sub> 处理(图 2)。花后 30 d 时,两个品种的 W<sub>3</sub> 处理 SPAD 值均高于其他处理,说明增加春季滴灌量可延缓强筋小麦叶片衰老,有利于光合生产。

2.2 滴灌量对强筋小麦各器官干物质积累动态的影响

在花后同一时间,两个强筋小麦品种各器官干物质积累量随滴灌量的增加均呈先升后降的趋势(图 3)。与 W<sub>0</sub> 处理相比,春季滴灌显著促进了强筋小麦各营养器官干物质积累。中麦 886 的茎鞘花后 5 d 和 30 d 的干物质积累量在 W<sub>3</sub>、W<sub>4</sub> 处理间差异不显著,不同滴灌量处理间叶片、颖壳+穗轴的干物质积累量在花后 0~15 d 时差异均不

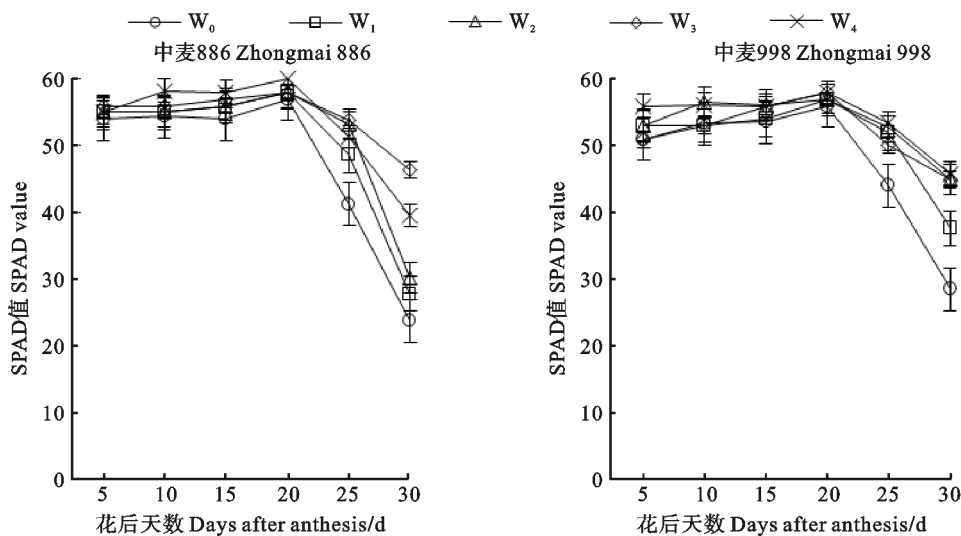
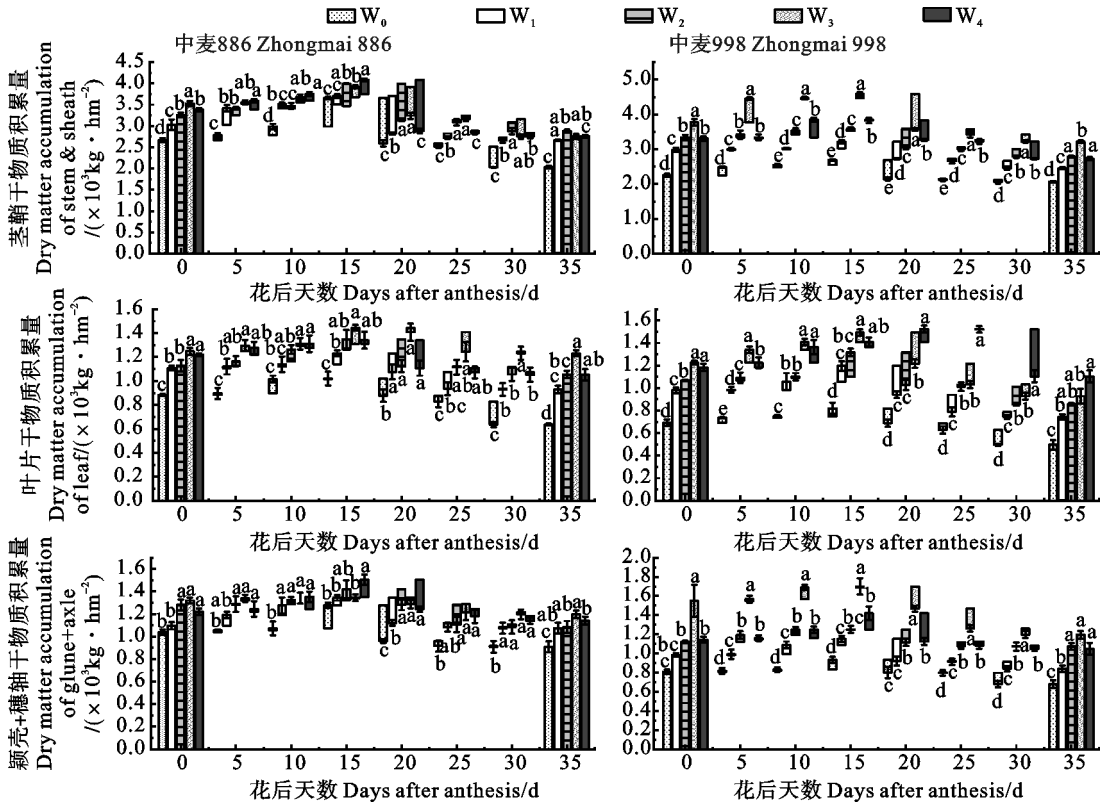


图 2 灌水量对强筋小麦旗叶 SPAD 值的影响

Fig. 2 Effect of irrigation amount on SPAD value of strong gluten wheat flag leaves



图柱上同品种同一时间上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Different normal letters above the columns of same variety and time indicate significant differences among different treatments ( $P < 0.05$ ).

图 3 灌水量对强筋小麦花后各营养器官干物质积累动态的影响

Fig. 3 Effect of irrigation amount on dry matter accumulation dynamics in various vegetative organs of strong gluten wheat

显著,但均显著高于  $W_0$  处理。

中麦 998 茎鞘、颖壳+穗轴、叶片的干物质积累量均在花后 15 d 达到最大值;花后 10 d 时  $W_1$  与  $W_2$ 、 $W_3$  与  $W_4$  处理间无明显差异;滴灌处理的颖壳+穗轴、茎鞘干物质积累量均显著高于  $W_0$  处理。强筋小麦干物质积累量在  $W_3$  处理下效果最佳,说明合理增加春季滴灌量有利于强筋小麦植株干物质积累,为高产稳产提供物质保障。

### 2.3 滴灌量对强筋小麦各营养器官花前贮存干物质转运的影响

在  $W_3$  和  $W_4$  处理间中麦 886 花前营养器官贮存干物质的总转运量差异不显著,但均显著高于其他处理,而中麦 998 的  $W_3$  处理最大,与其他处理差异均显著(表 1)。从不同器官看,中麦 886 茎鞘的干物质转运量、转运效率和贡献率均以  $W_4$  处理最高,叶片均以  $W_0$  处理最高,颖壳+穗轴均以  $W_2$  处理最高;中麦 998 的各器官干物质转运量、转运效率和贡献率均表现为  $W_3$  处理显著高于其他处理。这说明适量滴灌可促进花前干

物质转运。

### 2.4 滴灌量对强筋小麦灌浆速率的影响

两个强筋小麦品种千粒重在花后 5~25 d 快速增长,其后趋于平缓,在灌浆期呈“S”型变化趋势(图 4)。中麦 886、中麦 998 千粒重在花后 35 d 达到最大值,且均以  $W_3$  处理最高,分别较  $W_0$  处理高 7.09% 和 24.42%。

通过 Logistic 方程模拟分析(表 2),两个品种的灌浆高峰开始时间、渐增期持续时间、速增期持续时间、缓增期持续时间、最大灌浆速率出现时间、最大灌浆速率对春季滴灌量响应均显著,但达到最大值的处理并不完全一致,缺乏规律性,中麦 886 的平均灌浆速率在不同处理间差异不显著,而中麦 998 的平均灌浆速率在不同处理间差异显著,且以  $W_3$  处理最大。这说明适量春季滴灌有利于强筋小麦籽粒灌浆。

### 2.5 滴灌量对强筋小麦产量及 WUE 的影响

随春季滴灌量的增加,强筋小麦穗数、穗粒数、千粒重和产量均呈先增再降趋势,而小麦生育期耗水量和水分利用效率分别呈上升和下降趋势

(表 3)。灌水处理的产量及构成因素均高于  $W_0$  处理,其中最高均为  $W_3$  处理,与  $W_0$  处理差异均显著。其中, $W_1 \sim W_4$  处理下,中麦 886 的产量分别比  $W_0$  处理提高了 3.54%、3.55%、10.69%

和 10.02%,中麦 998 分别提高 17.37%、18.21%、22.22%和 22.18%。这说明春季滴灌可通过穗数、穗粒数和千粒重的协同提高来增加产量,且以  $W_3$  处理最佳。

表 1 灌水量对强筋小麦各营养器官干物质转运的影响

Table 1 Effects of irrigation amount on dry matter transport in various vegetative organs of strong gluten wheat

品种 Variety	处理 Treatment	转运量 Translocation amount/( $\times 10^3$ kg · hm <sup>-2</sup> )				转运效率 Transport efficiency/%			贡献率 Contribution rate/%		
		茎鞘 Stem & sheath	叶片 Leaf	颖壳+穗轴 Glume+axle	总量 Total	茎鞘 Stem & sheath	叶片 Leaf	颖壳+穗轴 Glume+axle	茎鞘 Stem & sheath	叶片 Leaf	颖壳+穗轴 Glume+axle
中麦 886 Zhongmai 886	$W_0$	0.65cd	0.30a	0.18c	1.13c	24.47d	33.48a	17.69a	17.10d	7.76a	4.83b
	$W_1$	0.59d	0.28c	0.06e	0.93d	19.42e	25.99c	5.11e	14.38e	7.05ab	1.37f
	$W_2$	0.89bc	0.26d	0.23a	1.38b	27.24c	23.40c	17.81a	20.39c	6.06c	5.23a
	$W_3$	1.10ab	0.26d	0.14d	1.50a	31.07b	21.15d	10.91c	22.70b	5.47d	2.98e
	$W_4$	1.06a	0.29b	0.19b	1.55a	31.44a	23.93c	15.74b	23.27a	6.39c	4.20c
中麦 998 Zhongmai 998	$W_0$	0.54e	0.20d	0.23b	0.97e	23.84c	29.48b	28.71b	15.55b	5.92c	6.73b
	$W_1$	0.76b	0.24c	0.17c	1.18b	25.57b	24.90d	17.07c	18.78b	6.00c	4.13c
	$W_2$	0.69c	0.28b	0.11e	1.08c	20.72d	25.84c	9.64e	16.93b	6.75b	2.64e
	$W_3$	1.27a	0.42a	0.47a	2.16a	33.62a	34.31a	30.49a	29.11a	9.64a	10.84a
	$W_4$	0.58d	0.28b	0.16d	1.02d	17.65e	23.31e	13.64d	14.12b	6.67b	3.77d

同一品种同列数据后不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著。下表同。

Different lowercase letters after the values in the same columns for the same variety indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in tables 2-3.

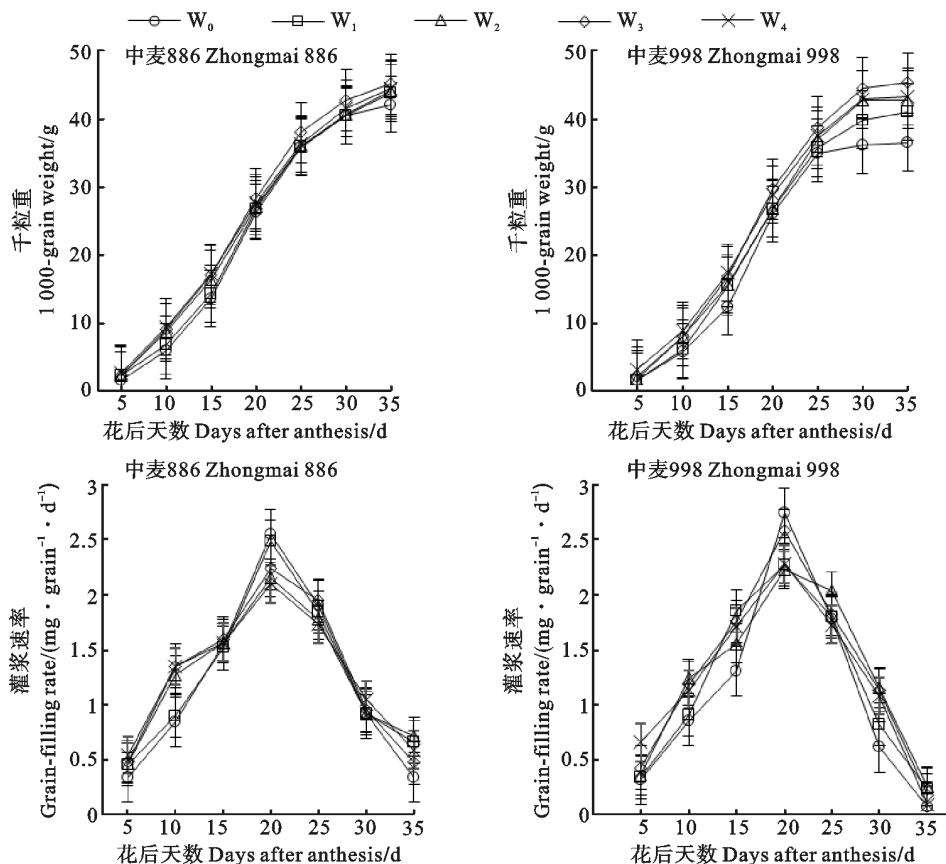


图 4 灌水量对强筋小麦千粒重和灌浆速率的影响

Fig. 4 Influence of irrigation amount on thousand-grain weight and grain-filling rate of strong gluten wheat

表 2 强筋小麦籽粒灌浆参数  
Table 2 Grain filling parameters of strong gluten wheat

品种 Variety	处理 Treatment	$t_1$ /d	$T_1$ /d	$T_2$ /d	$T_3$ /d	$t_m$ /d	$V_m/$ ( $\text{mg} \cdot \text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$V/$ ( $\text{mg} \cdot \text{grain}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$R^2$
中麦 886 Zhongmai 886	W <sub>0</sub>	12.33a	12.33a	10.97d	13.66d	17.82c	2.58a	1.16a	0.999 9
	W <sub>1</sub>	12.33a	12.33a	12.54c	15.61c	18.60a	2.34b	1.10a	0.999 7
	W <sub>2</sub>	11.28b	11.28b	13.86a	17.26a	18.21b	2.15c	1.07a	0.999 3
	W <sub>3</sub>	11.10c	11.10c	13.16b	16.39b	17.68c	2.33bc	1.14a	0.999 4
	W <sub>4</sub>	10.56d	10.56d	13.86a	17.26a	17.49d	2.19bc	1.10a	0.999 4
中麦 998 Zhongmai 998	W <sub>0</sub>	12.51a	12.51a	9.40e	11.71e	17.21c	2.61a	1.11b	0.998 2
	W <sub>1</sub>	11.58c	11.58c	10.97d	13.66d	17.06d	2.51b	1.15ab	0.999 9
	W <sub>2</sub>	11.98b	11.98b	12.54b	15.61b	18.25a	2.35c	1.12b	0.998 8
	W <sub>3</sub>	11.59c	11.59c	11.97c	14.90c	17.57b	2.57ab	1.21a	0.999 6
	W <sub>4</sub>	10.97d	10.97d	13.16a	16.39a	17.55b	2.25d	1.11b	0.999 6

$t_1$ : 灌浆高峰开始时间;  $T_1$ : 灌浆渐增期持续时间;  $T_2$ : 灌浆速增期持续时间;  $T_3$ : 灌浆缓增期持续时间;  $t_m$ : 最大灌浆速率出现时间;  $V_m$ : 最大灌浆速率;  $V$ : 平均灌浆速率。

$t_1$ : Peak of grain-filling;  $T_1$ : Duration of grouting incremental period;  $T_2$ : Duration of grouting rapid incremental period;  $T_3$ : Duration of grouting slow incremental period;  $t_m$ : Emergence time of maximal grouting rate;  $V_m$ : Maximal grouting rate;  $V$ : Average grouting rate.

表 3 灌水量对强筋小麦产量和水分利用效率的影响  
Table 3 Effect of irrigation amount on yield and WUE of strong gluten wheat

品种 Variety	处理 Treatment	穗数 Spikes/ ( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	ET/mm	WUE/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
中麦 886 Zhongmai 886	W <sub>0</sub>	608.00b	26.20d	39.18b	7 887.07c	625.26e	12.61a
	W <sub>1</sub>	700.80ab	33.10c	39.54b	8 165.90b	1 226.07d	6.66b
	W <sub>2</sub>	720.00ab	34.67a	39.63b	8 166.83b	1 521.56c	5.37c
	W <sub>3</sub>	772.80a	34.67a	45.22a	8 730.00a	1 829.06b	4.77d
	W <sub>4</sub>	737.60ab	33.67b	40.61ab	8 677.63ab	2 125.34a	4.08e
中麦 998 Zhongmai 998	W <sub>0</sub>	558.40c	30.47e	41.07c	7 874.90c	625.89e	12.58a
	W <sub>1</sub>	667.20b	33.43d	41.34bc	9 242.90b	1 224.22d	7.55b
	W <sub>2</sub>	726.40b	33.87c	42.23abc	9 309.20ab	1 526.83c	6.10c
	W <sub>3</sub>	868.80a	35.93a	42.57a	9 624.93a	1 823.17b	5.28d
	W <sub>4</sub>	732.80b	34.37b	42.43ab	9 621.67a	2 123.98a	4.53e

### 3 讨论

#### 3.1 滴灌量对强筋小麦干物质积累与转运的影响

光合作用是作物干物质积累的重要物质来源,而功能叶片 SPAD 值可间接反映植株光合作用强弱和营养状况。小麦叶片 SPAD 值的增加表明其叶绿素含量升高,光合作用增强,有助于植株干物质生产和积累,促进增产<sup>[18]</sup>。良好的灌溉措施能够维持较高的土壤湿度和营养供应,可延缓小麦旗叶衰老,增加生物量,同时促进营养物质向穗部输送,有利于籽粒产量提高<sup>[19]</sup>。本研究发现在相同水分条件下中麦 886 的旗叶 SPAD 值

与中麦 998 有差异,但花后 20 d 后两个品种的旗叶 SPAD 值均呈下降趋势,且灌水处理的下降趋势较慢,且在花后 30 d 均以 W<sub>3</sub> 处理最大,说明春季适量滴灌可增加强筋小麦叶片叶绿素含量,起到延缓功能叶片衰老和促进其光合的作用。前人的研究结果证实,不同品种光合速率在同一灌水处理下不同,在水分充足的条件下泰山 22 的光合速率高于济麦 20,适度灌水有利于提高小麦旗叶光合速率<sup>[20]</sup>。

本研究结果表明,随滴灌量的增加,强筋小麦各器官干物质积累量总体上呈先升再降趋势;W<sub>3</sub> 处理下干物质转运量最大,有利于强筋小麦籽粒

产量提升,说明水分供应不足和过量灌水均会使干物质积累与转运过程受到阻碍。

### 3.2 滴灌量对强筋小麦产量及其构成因素的影响

产量构成因素的协同提高是小麦产量形成的生理基础。粒重在很大程度上取决于籽粒灌浆速率和持续时间<sup>[3]</sup>。合适的水分供应促进小麦生长发育,提高光合作用效率,增强养分吸收和传输,改善灌浆速率,促进籽粒干物质积累,提升小麦产量。研究发现,在开花期对小麦进行涝渍处理后,籽粒灌浆期缩短,产量降低<sup>[21]</sup>。本研究也观察到,当滴灌量增加至  $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  时,产量有下降现象,灌浆渐增期持续时间缩短,与之相符。赛力汗·赛等<sup>[22]</sup>研究结果显示,小麦千粒重和籽粒灌浆持续时间随滴灌量的降低而降低,且灌浆速率峰值提前。Zhang 等<sup>[23]</sup>研究发现,灌水有利于小麦有效分蘖提高,增加穗数。本研究发现,灌水后产量的提升是穗数、穗粒数和千粒重协同提高的结果,这与灌水促进小麦分蘖成穗、穗花发育以及籽粒灌浆密切相关。

### 3.3 滴灌量对强筋小麦水分利用率的影响

滴灌量增加可提升小麦叶片光合能力、干物质积累量及籽粒产量,但降低水分利用效率<sup>[24,25]</sup>。本试验条件下,强筋小麦水分利用效率随滴灌量的增加呈下降趋势。这也说明合理范围内,增加灌水可促进强筋小麦有效地利用水分资源,但会导致水分利用效率下降。

## 4 结论

本试验条件下,冀东地区春灌拔节水+开花水  $0 \sim 600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  范围内,随滴灌量增加,旗叶 SPAD 值下降变缓,协调了物质积累转运与水分需求关系,促进了籽粒灌浆,使物质积累对籽粒的贡献率增加,进而提高了强筋小麦产量。综合考虑, $600 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  为最佳滴灌量。

### 参考文献:

[1]HAO T J,ZHU Z X,ZHANG Y L,*et al.* Effects of drip irrigation and fertilization frequency on yield, water and nitrogen use efficiency of medium and strong gluten wheat in the Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Agronomy*,2023,13(6):1564.

[2]范艺璇,王晓森,秦京涛,等. 小麦滴灌技术研究进展与发展趋势[J]. 中国农村水利水电,2024(3):175.

FAN Y X,WANG X S,QIN J T,*et al.* Research progresses and trends of drip irrigation technology on wheat [J]. *China Rural Water and Hydropower*,2024(3):175.

[3]LI J P,ZHANG Z,LIU Y,*et al.* Effects of micro-sprinkling with different irrigation amount on grain yield and water use efficiency of winter wheat in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*,2019,224:105736.

[4]ZHANG Y L,YU Z W,SHI Y,*et al.* Effects of supplemental irrigation based on soil water content on water consumption, dry matter and yield of wheat [J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*,2019,79(2):190-201.

[5]安浩军,李晓静,翟晓玲,等. 限水条件下不同类型冬小麦品种产量及光合特性的变化[J]. 江苏农业科学,2023,51(10):119.

AN H J,LI X J,ZHAI X L,*et al.* Changes of yield and photosynthetic characteristics of different winter wheat varieties under water restriction [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*,2023,51(10):119.

[6]张晓琪,李红玉,杨思,等. 灌水对冬小麦群体、花后干物质和籽粒淀粉积累的影响[J]. 生态学杂志,2023,42(1):39.

ZHANG X Q,LI H Y,YANG S,*et al.* Effects of irrigation on the population development and accumulation of dry matter at post-anthesis and starch in grains of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Ecology*,2023,42(1):39.

[7]王德梅,于振文,张永丽,等. 灌水对不同小麦品种物质生产及水分利用的影响[J]. 麦类作物学报,2010,30(2):366.

WANG D M,YU Z W,ZHANG Y L,*et al.* Effects of irrigation on dry matter production and water use of different wheat cultivars [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2010,30(2):366.

[8]郭飞,吴正虎,吾斯满江,等. 新疆滴灌小麦不同滴水量对春小麦干物质的积累动态及产量影响[J]. 耕作与栽培,2019,39(1):19.

GUO F,WU Z H,WU S,*et al.* The impact of different drip volumes of drip irrigation of Xinjiang wheat on spring wheat dry matter accumulation and yield [J]. *Tillage and Cultivation*,2019,39(1):19.

[9]阚茗溪,王艳杰,于慧玲,等. 灌水对节水小麦“衡观 35”产量、蛋白质含量及光合性能的影响[J]. 作物杂志,2023(1):68.

KAN M X,WANG Y J,YU H L,*et al.* Effects of irrigation on yield,protein content and photosynthetic performance of water-saving wheat “Hengguan 35” [J]. *Crops*,2023(1):68.

[10]李翠平,秦保平,李亚静,等. 减少灌水量对强筋小麦花后干物质和氮素积累、转运及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2020,40(8):964.

LI C P,QIN B P,LI Y J,*et al.* Effect of reducing irrigation amount on the accumulation and translocation of dry matter and nitrogen and grain yield after flowering of strong gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2020,40(8):964.

[11]AHMAD Z,AHMAD WARAICH E,AKHTAR S,*et al.* Physiological responses of wheat to drought stress and its mitigation approaches [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*,2018,40(4):1.

[12]GAO J W,SU Y,YU M,*et al.* Potassium alleviates post-anthesis photosynthetic reductions in winter wheat caused by waterlogging at the stem elongation stage [J]. *Frontiers in*

- Plant Science*, 2021, 11: 607475.
- [13] 何璐, 张利茹, 杨若沂, 等. 限水灌溉时期对冬小麦各叶层衰退和群体光合的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(4): 167.  
HE L, ZHANG L R, YANG R Q, *et al.* Effects of water-limited irrigation period on decay of each leaf layer and population photosynthesis of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(4): 167.
- [14] 刘锟, 江继顺, 石玉, 等. 不同产量水平麦田小麦冠层光能利用和干物质积累特性研究[J]. 山东农业科学, 2023, 55(9): 39.  
LIU K, JIANG J S, SHI Y, *et al.* Characteristics of light energy utilization and dry matter accumulation of wheat canopy in fields with different yield levels [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(9): 39.
- [15] 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.  
HUI H B, LIU Y G, LIU J B, *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.
- [16] 李雪萌, 杨梅, 秦保平, 等. 施氮量对强筋小麦物质积累与籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(5): 609.  
LI X M, YANG M, QIN B P, *et al.* Effect of nitrogen application rate on matter accumulation and grain yield of strong gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(5): 609.
- [17] 刘希伟, 张敏, 姚凤娟, 等. 花后不同强度遮光对糯小麦和非糯小麦干物质积累和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(4): 521.  
LIU X W, ZHANG M, YAO F J, *et al.* Effects of different shading intensity after flowering on dry matter accumulation and yield of waxy and non-waxy wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(4): 521.
- [18] 盖盼盼, 侯君佑, 耿兵婕, 等. 花后渍水和高温对小麦旗叶光合特性、干物质积累及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(10): 1247.  
GAI P P, HOU J Y, GENG B J, *et al.* Effect of waterlogging and high temperature post-anthesis on photosynthetic characteristics of flag leaves, dry matter accumulation and yield in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(10): 1247.
- [19] 孟维伟, 张永丽, 马兴华, 等. 灌水时期和灌水量对小麦耗水特性和旗叶光合作用及产量的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(10): 1884.  
MENG W W, ZHANG Y L, MA X H, *et al.* Effects of irrigation stage and amount on water consumption characteristics, flag leaf photosynthesis, and grain yield in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(10): 1884.
- [20] 于慧玲, 阙茗溪, 徐哲莉, 等. 匀播和条播小麦产量及干物质积累对春季灌水量的响应[J]. 作物学报, 2023, 49(10): 2833.  
YU H L, KAN M X, XU Z L, *et al.* Yield and dry matter accumulation of wheat in response to spring irrigation water in uniform sowing and strip sowing [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(10): 2833.
- [21] ARATA A F, DINOLFO M I, MARTÍNEZ M, *et al.* Effects of waterlogging during grain filling on yield components, nitrogen uptake and grain quality in bread wheat [J]. *Cereal Research Communications*, 2019, 47(1): 42.
- [22] 赛力汗·赛, 薛丽华, 张永强, 等. 滴灌量对冬小麦干物质积累、灌浆和籽粒产量的影响及行间差异[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(3): 323.  
SAI S L H, XUE L H, ZHANG Y Q, *et al.* Effect of drip irrigation amount on dry matter accumulation, grain filling and yield of winter wheat, and their differences between lines [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(3): 323.
- [23] ZHANG M, CHEN W, JING M, *et al.* Canopy structure, light intensity, temperature and photosynthetic performance of winter wheat under different irrigation conditions [J]. *Plants*, 2023, 12(19): 3482.
- [24] 吴海旭, 闫博文, 薛丽华, 等. 不同滴水量对冬播春小麦生长发育及水分利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(1): 71.  
WU H X, YAN B W, XUE L H, *et al.* Effects of different drip rates on growth and water use efficiency of winter sown spring wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(1): 71.
- [25] ZHAO W H, LIU L Z, SHEN Q, *et al.* Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat [J]. *Water*, 2020, 12(8): 2127.