

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.026

# 水肥一体化对小麦干物质和氮素积累转运及产量的影响

张丽霞<sup>1,2</sup> 杨永辉<sup>1,3</sup> 尹 钧<sup>2</sup> 武继承<sup>1,3</sup> 潘晓莹<sup>1,3</sup>

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2. 河南农业大学国家小麦工程技术研究中心, 郑州 450046;  
3. 农业农村部作物高效用水原阳科学观测实验站, 原阳 453514)

**摘要:** 为探讨滴灌水肥一体化对小麦干物质和氮素积累、转运与产量的影响, 于2016—2018年2个小麦生长季进行田间试验, 设置3个氮(N)肥水平 N1(180 kg/hm<sup>2</sup>)、N2(240 kg/hm<sup>2</sup>)、N3(270 kg/hm<sup>2</sup>)和3个水分(W)水平 W1(生育期不灌水)、W2(生育期灌2次水)、W3(生育期灌3次水), 9个处理分别为: W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3。结果表明: 连续2年, 小麦植株干物质积累量在开花期和成熟期达到最大, 与W1N1处理相比, W3N2处理下小麦开花期植株平均干物质积累量、成熟期植株平均干物质积累量、营养器官平均干物质转运量、平均干物质转运率和干物质转运对籽粒平均贡献率分别增加32.11%、13.34%、48.66%、56.34%、42.93%; 连续2年, 小麦植株氮素积累量在小麦开花期和成熟期达到最大, 与W1N1处理相比, W3N2处理下小麦开花期和成熟期植株平均氮素积累量分别增加21.98%和20.30%; 在小麦成熟期, 与W1N1处理相比, W3N2处理下小麦茎+叶鞘平均氮素积累量、穗轴+颖壳平均氮素积累量、籽粒平均氮素积累量、营养器官平均氮素转运量、平均氮素转运率和营养器官氮素转运对籽粒平均贡献率分别增加20.19%、27.65%、35.99%、47.51%、20.91%和6.04%; 连续2年, 与W1N1处理相比, W3N2和W3N3处理下小麦平均产量分别增加31.88%和15.28%。研究表明, 滴灌水肥一体化下W3N2处理是本试验的最优处理, 能够促进营养器官干物质和氮素的积累与转运, 有利于实现小麦高产高效。

**关键词:** 小麦; 滴灌水肥一体化; 干物质; 氮素; 积累; 转运

中图分类号: S275.6; S365

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)02-0275-08

OSID:



## Effects of Drip Fertigation on Accumulation and Translocation of Dry Matter and Nitrogen together with Yield in Wheat

ZHANG Lixia<sup>1,2</sup> YANG Yonghui<sup>1,3</sup> YIN Jun<sup>2</sup> WU Jicheng<sup>1,3</sup> PAN Xiaoying<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China

2. National Engineering Research Center for Wheat, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China

3. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yuanyang 453514, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of drip fertigation on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen, and yield in wheat, three nitrogen (N) fertilizer levels: N1 (180 kg/hm<sup>2</sup>), N2 (240 kg/hm<sup>2</sup>) and N3 (270 kg/hm<sup>2</sup>), and three water (W) levels: W1 (no irrigation at the growth stage), W2 (two times irrigation at the growth stage), and W3 (three times irrigation at the growth stage), were set in two wheat growing seasons (2016—2018) by field experiment. The nine treatments were W1N1, W1N2, W1N3, W2N1, W2N2, W2N3, W3N1, W3N2, and W3N3. The results showed that dry matter accumulation of wheat plant reached its maximum at the flowering and maturing stages in two consecutive years. Compared with the W1N1 treatment, W3N2 treatment increased average dry matter accumulation at the flowering and mature stages, average dry matter translocation amount of the vegetative organs, average dry matter translocation rate, and average contribution rate of dry matter translocation to grain by 32.11%, 13.34%, 48.66%, 56.34%, 42.93%, respectively. In two consecutive years, nitrogen accumulation of wheat plant reached the maximum at the flowering and

收稿日期: 2020-09-02 修回日期: 2020-11-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0301102, 2018YFD0300703)

作者简介: 张丽霞(1982—), 女, 讲师, 博士, 主要从事农业资源与生态环境研究, E-mail: lixiaozhang1010@126.com

通信作者: 武继承(1965—), 男, 研究员, 博士, 主要从事节水农业与农业生态研究, E-mail: wujc2065@126.com

maturing stages of wheat. Compared with W1N1 treatment, average nitrogen accumulation at both flowering and maturing stages of wheat under W3N2 treatment was increased by 21.98% and 20.30%, respectively. In the mature stage of wheat, compared with W1N1 treatment, W3N2 treatment increased average nitrogen accumulation of stem and sheath, average nitrogen accumulation of cob and glume, average nitrogen accumulation of grain, average nitrogen transformation amount, average nitrogen transformation rate and average contribution rate of nitrogen transformation to grain by 20.19%, 27.65%, 35.99%, 47.51%, 20.91%, 6.04%, respectively. In two consecutive years, compared with W1N1 treatment, W3N2 and W3N3 treatment increased average wheat yield by 31.88% and 15.28%, respectively. In conclusion, the W3N2 treatment was the best in the drip fertigation, which was applied to wheat with 240 kg/hm<sup>2</sup> pure nitrogen, 60% pure nitrogen was applied at the bottom, 25% of pure nitrogen was added at the jointing stage and 15% of pure nitrogen was added at the filling stage, respectively, and three times irrigation at the jointing stage, flowering stage and filling stage under the drip fertigation, which could promote the accumulation and translocation of dry matter and nitrogen of vegetative organs, so as to promote the high-yield and high-efficient wheat.

**Key words:** wheat; drip fertigation; dry matter; nitrogen; accumulation; translocation

## 0 引言

在小麦生产中水、肥相互促进又互相制约,科学的水肥一体化技术能够精准灌溉、施肥,促进作物对肥料、水分的吸收与利用,起到以水调肥、以肥促水的作用,从而实现小麦增产增收和节水节肥。养分吸收是作物干物质积累的基础,小麦籽粒产量和蛋白质含量既受开花前贮存碳、氮物质的调节影响,又取决于开花期到成熟期植株的光合生产能力和氮积累能力<sup>[1-3]</sup>,特别是受到开花后干物质和氮素从营养器官向籽粒转运能力的影响<sup>[4-6]</sup>。因此,研究小麦干物质和氮素积累和转运变化对提高小麦产量具有重要意义。

小麦孕穗期前叶片干物质分配率达到高峰,随后开始下降;孕穗期后植株开始由营养生长逐渐转向生殖生长,干物质开始向穗器官转移;在灌浆期至成熟期,穗干物质质量一直增加,穗器官成为干物质转运与积累中心<sup>[7]</sup>。适量施氮能够促进小麦干物质积累,有利于叶片、茎和鞘花前贮存干物质在花后向籽粒中转移;但是高氮处理会导致植株营养生长过旺,贪青晚熟,抑制生殖生长,使穗干物质积累减少<sup>[8-10]</sup>。在高水条件下,随施氮量的增加干物质呈直线增长的趋势<sup>[7]</sup>;适量的水分能促进穗部干物质积累速率和氮素积累量的提高,有利于小麦高产<sup>[11]</sup>。开花期至成熟期是小麦氮素吸收和分配的关键时期,开花后营养器官氮素转运对籽粒氮素积累有较大贡献<sup>[12]</sup>。现有研究普遍认为,小麦氮素吸收量与施氮量呈正相关,但过高氮肥用量对小麦氮素积累影响不大<sup>[13]</sup>。有研究认为,干旱胁迫、土壤含水率过高都将降低营养器官氮素向籽粒的转运量和转运率<sup>[14-16]</sup>。

目前,滴灌是最佳的节水增效灌溉方式,具有节水、提肥和增效等多种优势,对干旱地区作物优质高产起到重要作用。滴灌水肥一体化利用滴灌方式,将灌溉与施肥相结合,能够有效控制水肥量、时间和水肥入渗深度,还能维持根部适宜的养分供应,促进作物的生长发育。滴灌水肥一体化条件下对小麦干物质和氮素积累、转运及产量相结合的研究较少,本文在前期研究基础上,研究滴灌水肥一体化技术对小麦干物质和氮素积累与转运及产量的影响,探讨水肥一体化下小麦干物质和氮素积累、转运与产量形成的关系,为制定充分发挥水肥协同作用、提高小麦产量的水氮科学运筹措施提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

本试验于2016—2018年在河南省通许县节水农业试验示范基地(114.47°E、34.48°N,海拔62 m)进行,该地区气候类型为暖温带大陆性季风气候,多年平均降水量为657.9 mm,且主要集中在6—9月,年均气温14.6℃,全年无霜期222 d。该试验地土壤为壤质潮土,土壤耕层有机质质量比11.4 g/kg、全氮质量比0.81 g/kg、全磷质量比0.72 g/kg、碱解氮质量比74.31 mg/kg、速效磷质量比19.8 mg/kg、速效钾质量比90.3 mg/kg;土壤容重1.32 g/cm<sup>3</sup>;土壤机械组成主要为砂粒(0.020~2 mm)占83%、粉粒(0.002~0.020 mm)占8.3%和黏粒(0~0.002 mm)占8.7%。

### 1.2 试验材料及种植方法

供试小麦品种为矮抗58,10月中下旬播种,播种量为150 kg/hm<sup>2</sup>,行距20 cm,每个小区播种24

行,铺设8条滴灌带,次年6月上旬收获。氮肥、磷肥、钾肥分别为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含 $P_2O_5$  12%)、氯化钾(含 $K_2O$  50%)。

### 1.3 试验设计

采用随机区组设计,灌溉方式为滴灌,滴头流量为2~3 L/h,滴头间距30 cm,滴灌带间隔40~50 cm,每次灌水量为 $450\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,灌水分别在小麦拔节期、开花期和灌浆期进行。基于课题组已有的试验结果,在前期氮肥不同水平分期追施的基础上,底肥少施的水肥一体化技术更有利于小麦产量和水肥利用效率的提高,本试验设置3个氮(N)肥水平:N1( $180\text{ kg}/\text{hm}^2$ )、N2( $240\text{ kg}/\text{hm}^2$ )、N3( $270\text{ kg}/\text{hm}^2$ ),氮肥基追比为:60%+40%,氮肥追肥比为:25%+15%,分别在小麦拔节期和灌浆期进行追施。水分(W)设置3个水平:W1(生育期不灌水)、W2(生育期灌2次水( $900\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ))、W3(生育期灌3次水( $1350\text{ m}^3/\text{hm}^2$ )),2次水在小麦拔节期和灌浆期各进行1次灌溉,3次水在小麦拔节期、开花期和灌浆期各进行1次灌溉。试验根据当地季节性降水分配设定灌水量,在2016—2017年和2017—2018年连续2年对小麦进行的灌水量能够满足小麦生长发育的需要。共设置9个处理,分别为:W1N1、W1N2、W1N3、W2N1、W2N2、W2N3、W3N1、W3N2、W3N3,每个处理重复3次,共27个小区,每个小区面积为 $22.4\text{ m}^2$ ( $5.6\text{ m}\times 4\text{ m}$ )。氮肥按照基肥追肥比例进行底施,并与磷肥( $P_2O_5$ ,  $105\text{ kg}/\text{hm}^2$ )、钾肥( $K_2O$ ,  $105\text{ kg}/\text{hm}^2$ )一同随水一次性施入,底墒水的灌溉量为 $450\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,其他时期均按试验处理进行水肥管理。本试验中,W1为生育期不灌水,在追施氮肥时采用沟施的方式进行施肥,W2、W3为生育期灌水,实施滴灌水肥一体化时氮肥随水一同施入。

### 1.4 测定项目及方法

#### 1.4.1 小麦植株干物质质量

在小麦拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和成熟期采取植株样品,开花期植株样品分为叶片、茎秆和穗3部分,成熟期分为叶片、茎+叶鞘、穗轴+颖壳、籽粒4部分。样品于 $105^\circ\text{C}$ 杀青30 min,然后于 $70^\circ\text{C}$ 干燥至恒质量,用精度为0.01 g的电子天平称量干物质质量。

#### 1.4.2 小麦植株干物质转运量

花前营养器官干物质转运量为开花期营养器官干物质与成熟期营养器官干物质的差值;花前营养器官干物质转移率(%)为花前营养器官干物质转运量占开花期营养器官干物质质量百分比;花前营养器官干物质对籽粒产量贡献率(%)为花前营养器官干物质转运量占成熟期籽粒干物质质量百

分比。

#### 1.4.3 小麦植株全氮含量

采用 $H_2SO_4$ -混合指示剂-蒸馏法测定小麦植株全氮含量。用三品科创SPD80型全自动凯氏定氮仪进行全氮含量测定,得出小麦植株不同器官全氮含量。

#### 1.4.4 小麦植株氮素转运量

花前营养器官氮素转运量为开花期各营养器官氮素积累量与成熟期各营养器官氮素积累量差值;花前营养器官氮素转运率(%)为营养器官氮素转运量占开花期营养器官氮素积累量百分比;花前营养器官氮素转运对籽粒贡献率(%)为营养器官氮素转运量占成熟期籽粒氮素积累量百分比。

### 1.5 数据处理

试验数据采用Excel 2010和SPSS 19.0软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦生育期内降雨量

由图1可以看出,在2016—2018年连续2年中,小麦生育期内降雨量主要集中在10月和5月,其他月份相对较少。小麦播种后降雨量逐渐增多,但从分蘖期开始到返青期前降雨量较少,从抽穗期开始降雨量逐渐增多,一直到灌浆期。在2016—2017年,小麦生育期内降雨10次,总降雨量为258.3 mm;在2017—2018年,小麦生育期内降雨11次,总降雨量为279.2 mm。

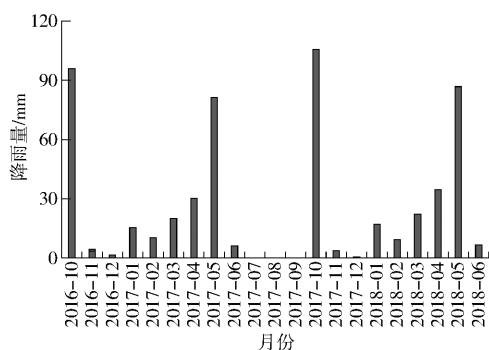


图1 小麦生育期内逐月降雨量

Fig.1 Monthly rainfall in growth stage of wheat

### 2.2 滴灌水肥一体化对小麦干物质积累、分配和转运的影响

#### 2.2.1 小麦干物质的积累动态

由图2可以看出,连续2年,与W1N1处理相比,W3N2处理下小麦拔节期、孕穗期和开花期植株平均干物质积累量分别增加37.64%、31.21%和32.11%;W3N2和W3N3处理下小麦成熟期植株干物质积累量提高13.34%和11.78%。因此,W3N2

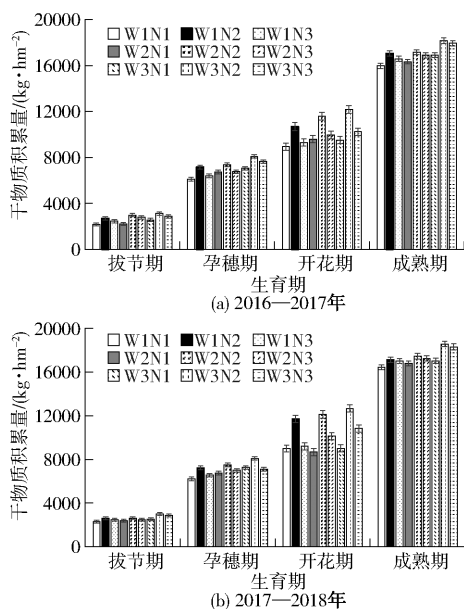


图2 滴灌水肥一体化对小麦干物质积累量的影响

Fig. 2 Effects of drip fertigation on dry matter accumulation of wheat

表1 滴灌水肥一体化对小麦成熟期干物质积累和分配的影响

Tab. 1 Effects of drip fertigation on dry matter accumulation and distribution of wheat at maturity stage

年份	处理	干物质积累量/(kg·hm <sup>-2</sup> )				分配比例/%			
		茎+叶鞘	叶片	穗轴+颖壳	籽粒	茎+叶鞘	叶片	穗轴+颖壳	籽粒
2016—2017	W1N1	4 128.45 <sup>c</sup>	1 407.23 <sup>b</sup>	1 123.45 <sup>b</sup>	9 324.56 <sup>c</sup>	25.83 <sup>b</sup>	8.80 <sup>a</sup>	7.03 <sup>a</sup>	55.21 <sup>b</sup>
	W1N2	4 523.54 <sup>bc</sup>	1 534.76 <sup>ab</sup>	1 354.76 <sup>ab</sup>	9 640.09 <sup>bc</sup>	26.53 <sup>b</sup>	9.01 <sup>a</sup>	7.94 <sup>a</sup>	55.53 <sup>b</sup>
	W1N3	4 256.21 <sup>c</sup>	1 367.43 <sup>b</sup>	1 209.98 <sup>b</sup>	9 750.56 <sup>bc</sup>	25.66 <sup>b</sup>	8.25 <sup>a</sup>	7.30 <sup>a</sup>	56.12 <sup>b</sup>
	W2N1	4 237.76 <sup>c</sup>	1 427.12 <sup>b</sup>	1 229.34 <sup>b</sup>	9 430.45 <sup>c</sup>	25.96 <sup>b</sup>	8.74 <sup>a</sup>	7.53 <sup>a</sup>	55.76 <sup>b</sup>
	W2N2	4 576.21 <sup>bc</sup>	1 547.23 <sup>a</sup>	1 369.34 <sup>a</sup>	9 655.78 <sup>bc</sup>	26.69 <sup>b</sup>	9.02 <sup>a</sup>	7.99 <sup>a</sup>	55.46 <sup>b</sup>
	W2N3	4 412.87 <sup>bc</sup>	1 345.23 <sup>b</sup>	1 278.12 <sup>b</sup>	9 860.67 <sup>ab</sup>	26.12 <sup>b</sup>	7.96 <sup>a</sup>	7.56 <sup>a</sup>	56.26 <sup>a</sup>
	W3N1	4 478.23 <sup>bc</sup>	1 478.12 <sup>b</sup>	1 302.43 <sup>ab</sup>	9 645.34 <sup>bc</sup>	26.49 <sup>b</sup>	8.74 <sup>a</sup>	7.70 <sup>a</sup>	55.82 <sup>b</sup>
	W3N2	5 304.54 <sup>a</sup>	1 589.34 <sup>a</sup>	1 387.34 <sup>a</sup>	10 281.67 <sup>a</sup>	29.18 <sup>a</sup>	8.74 <sup>a</sup>	7.63 <sup>a</sup>	56.55 <sup>a</sup>
	W3N3	4 867.23 <sup>b</sup>	1 509.45 <sup>ab</sup>	1 289.32 <sup>b</sup>	9 897.45 <sup>a</sup>	27.12 <sup>b</sup>	8.41 <sup>a</sup>	7.18 <sup>a</sup>	55.10 <sup>b</sup>
2017—2018	W1N1	4 567.45 <sup>b</sup>	1 306.32 <sup>b</sup>	1 234.45 <sup>b</sup>	9 340.04 <sup>b</sup>	27.77 <sup>b</sup>	7.94 <sup>a</sup>	7.51 <sup>a</sup>	55.28 <sup>b</sup>
	W1N2	4 687.45 <sup>b</sup>	1 439.23 <sup>ab</sup>	1 345.23 <sup>b</sup>	9 660.56 <sup>b</sup>	27.36 <sup>b</sup>	8.40 <sup>a</sup>	7.85 <sup>a</sup>	55.39 <sup>b</sup>
	W1N3	4 523.41 <sup>b</sup>	1 376.21 <sup>b</sup>	1 232.12 <sup>b</sup>	9 880.89 <sup>ab</sup>	26.59 <sup>b</sup>	8.09 <sup>a</sup>	7.24 <sup>a</sup>	56.08 <sup>a</sup>
	W2N1	4 497.21 <sup>b</sup>	1 376.23 <sup>b</sup>	1 376.45 <sup>b</sup>	9 560.78 <sup>b</sup>	26.75 <sup>b</sup>	8.19 <sup>a</sup>	8.19 <sup>a</sup>	55.47 <sup>b</sup>
	W2N2	4 723.12 <sup>b</sup>	1 576.12 <sup>a</sup>	1 495.65 <sup>a</sup>	9 670.12 <sup>b</sup>	27.04 <sup>b</sup>	9.02 <sup>a</sup>	8.56 <sup>a</sup>	55.25 <sup>b</sup>
	W2N3	4 532.43 <sup>b</sup>	1 435.68 <sup>ab</sup>	1 398.21 <sup>b</sup>	9 886.78 <sup>ab</sup>	26.27 <sup>b</sup>	8.32 <sup>a</sup>	8.10 <sup>a</sup>	55.36 <sup>b</sup>
	W3N1	4 512.12 <sup>b</sup>	1 476.43 <sup>ab</sup>	1 387.34 <sup>b</sup>	9 660.45 <sup>b</sup>	26.49 <sup>b</sup>	8.67 <sup>a</sup>	8.14 <sup>a</sup>	54.35 <sup>b</sup>
	W3N2	5 501.21 <sup>a</sup>	1 598.23 <sup>a</sup>	1 500.32 <sup>a</sup>	10 455.03 <sup>a</sup>	29.61 <sup>a</sup>	8.60 <sup>a</sup>	8.08 <sup>a</sup>	56.27 <sup>a</sup>
	W3N3	5 034.23 <sup>a</sup>	1 345.54 <sup>b</sup>	1 467.43 <sup>ab</sup>	9 979.56 <sup>a</sup>	27.51 <sup>b</sup>	7.35 <sup>a</sup>	8.02 <sup>a</sup>	54.50 <sup>b</sup>

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

### 2.2.3 开花后营养器官干物质向籽粒的运转

由表2可以看出,2016—2017年,与W1N1相比,W2N2和W3N2处理下小麦营养器官干物质转运量提高52.22%和53.04%;W3N2和W3N3下小麦营养器官干物质转运率增加59.80%和53.62%,营养器官干物质转运对籽粒贡献率分别提高54.50%和49.45%。2017—2018年,与W1N1相比,W3N2和W3N3处理下小麦营养器官干物质转

处理有利于小麦植株干物质的积累。

### 2.2.2 小麦成熟期干物质的积累和分配

由表1可以看出,在成熟期,籽粒是干物质积累与运转中心,各器官干物质积累量和分配比例从大到小均为籽粒、茎+叶鞘、叶片、穗轴+颖壳。连续2年,与W1N1处理相比,W3N2和W3N3处理分别使小麦茎+叶鞘干物质积累量增加22.93%和12.65%;W2N2和W3N2处理使小麦叶片干物质积累量增加15.30%和17.97%,使小麦穗轴+颖壳干物质积累量增加21.53%和22.52%;W3N2和W3N3处理分别使小麦籽粒干物质积累量增加11.10%和6.50%。从各器官干物质积累量分配比例来看,与W1N1处理相比,W3N2处理使小麦茎+叶鞘干物质积累量分配比例增加9.81%;W3N2处理使小麦籽粒干物质积累量分配比例增加2.11%。因此,在小麦成熟期,W3N2处理更有利于小麦不同器官干物质积累和分配。

运量提高44.27%和27.49%,小麦营养器官干物质转运率分别增加52.87%和43.11%;W3N2处理下小麦营养器官干物质转运对籽粒贡献率提高31.35%。由此可知,连续2年,与W1N1相比,W3N2处理下小麦营养器官平均干物质转运量提高48.66%,小麦营养器官平均干物质转运率提高56.34%,营养器官干物质转运对籽粒平均贡献率增加42.93%。因此,滴灌方式下,W3N2处理更有利

于小麦营养器官干物质的转运,这说明 W3N2 处理能较好地协调物质生产与分配的关系,促进小麦植株健壮,提高生长有效性。

表2 滴灌水肥一体化对小麦营养器官干物质转运的影响

Tab.2 Effects of drip fertigation on dry matter translocation of vegetative organ in wheat

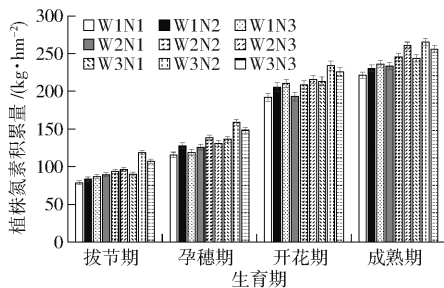
年份	处理	营养器官干	营养器官	营养器官干物
		物质转运量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	干物质转 运率/%	质转运对籽粒 贡献率/%
2016—2017	W1N1	3 171.66 <sup>b</sup>	33.34 <sup>b</sup>	32.88 <sup>b</sup>
	W1N2	4 591.23 <sup>ab</sup>	42.96 <sup>b</sup>	47.63 <sup>ab</sup>
	W1N3	4 537.36 <sup>ab</sup>	36.27 <sup>b</sup>	37.52 <sup>b</sup>
	W2N1	3 713.20 <sup>b</sup>	37.28 <sup>b</sup>	45.42 <sup>b</sup>
	W2N2	4 827.87 <sup>a</sup>	41.61 <sup>b</sup>	48.96 <sup>ab</sup>
	W2N3	4 347.93 <sup>b</sup>	43.62 <sup>b</sup>	45.03 <sup>b</sup>
	W3N1	4 283.53 <sup>b</sup>	44.68 <sup>b</sup>	44.13 <sup>b</sup>
	W3N2	4 853.76 <sup>a</sup>	53.28 <sup>a</sup>	50.80 <sup>a</sup>
	W3N3	4 581.80 <sup>ab</sup>	51.22 <sup>a</sup>	49.14 <sup>a</sup>
2017—2018	W1N1	3 639.03 <sup>b</sup>	29.30 <sup>b</sup>	40.45 <sup>b</sup>
	W1N2	3 778.27 <sup>b</sup>	36.62 <sup>b</sup>	37.43 <sup>b</sup>
	W1N3	3 892.89 <sup>b</sup>	26.37 <sup>b</sup>	40.30 <sup>b</sup>
	W2N1	3 286.52 <sup>b</sup>	34.47 <sup>b</sup>	33.92 <sup>b</sup>
	W2N2	3 997.90 <sup>b</sup>	32.98 <sup>b</sup>	40.44 <sup>b</sup>
	W2N3	3 594.13 <sup>b</sup>	35.49 <sup>b</sup>	37.17 <sup>b</sup>
	W3N1	3 735.76 <sup>b</sup>	41.93 <sup>b</sup>	37.73 <sup>b</sup>
	W3N2	5 249.96 <sup>a</sup>	44.79 <sup>a</sup>	53.13 <sup>a</sup>
	W3N3	4 638.56 <sup>a</sup>	42.30 <sup>a</sup>	44.37 <sup>b</sup>

2.3 滴灌水肥一体化对小麦氮素积累和转运的影响

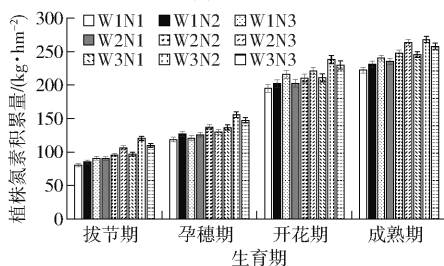
2.3.1 小麦植株氮素的积累动态

由图3可以看出,连续2年,与 W1N1 相比,

W3N2 和 W3N3 处理下小麦拔节期植株平均氮素积累量增加 50.36% 和 36.22%,小麦孕穗期植株平均氮素积累量增加 34.40% 和 26.21%。W2N3、W3N2 和 W3N3 处理下小麦开花期植株平均氮素积累量分别提高 12.84%、21.98% 和 17.67%。W2N2、W2N3、W3N2 和 W3N3 处理下小麦成熟期植株平均氮素积累量分别增加 11.15%、15.82%、20.30% 和 18.15%。



(a) 2016—2017年



(b) 2017—2018年

图3 滴灌水肥一体化对小麦植株氮积累量的影响

Fig.3 Effects of drip fertigation on nitrogen accumulation amount of wheat

2.3.2 小麦成熟期氮素的积累和分配

由表3可以看出,在成熟期,小麦各器官氮素积

表3 滴灌水肥一体化对小麦成熟期氮素积累和分配的影响

Tab.3 Effects of drip fertigation on nitrogen accumulation and distribution of wheat at maturity stage

年份	处理	氮素积累量/(kg·hm <sup>-2</sup> )				分配比例/%			
		茎+叶鞘	叶片	穗轴+颖壳	籽粒	茎+叶鞘	叶片	穗轴+颖壳	籽粒
2016—2017	W1N1	40.03 <sup>b</sup>	19.89 <sup>a</sup>	25.63 <sup>b</sup>	128.91 <sup>b</sup>	18.09 <sup>a</sup>	8.99 <sup>a</sup>	9.66 <sup>b</sup>	58.27 <sup>b</sup>
	W1N2	42.67 <sup>b</sup>	20.78 <sup>a</sup>	25.00 <sup>b</sup>	147.76 <sup>b</sup>	18.06 <sup>a</sup>	8.80 <sup>a</sup>	10.58 <sup>b</sup>	62.56 <sup>ab</sup>
	W1N3	41.05 <sup>b</sup>	21.54 <sup>a</sup>	21.97 <sup>b</sup>	135.78 <sup>b</sup>	17.82 <sup>a</sup>	9.35 <sup>a</sup>	10.83 <sup>b</sup>	58.95 <sup>b</sup>
	W2N1	42.98 <sup>b</sup>	21.01 <sup>a</sup>	28.11 <sup>ab</sup>	141.46 <sup>b</sup>	18.40 <sup>a</sup>	9.00 <sup>a</sup>	12.04 <sup>ab</sup>	60.57 <sup>b</sup>
	W2N2	44.87 <sup>b</sup>	23.34 <sup>a</sup>	26.02 <sup>b</sup>	166.53 <sup>a</sup>	17.21 <sup>a</sup>	8.95 <sup>a</sup>	9.98 <sup>b</sup>	63.86 <sup>a</sup>
	W2N3	43.56 <sup>b</sup>	23.67 <sup>a</sup>	26.15 <sup>b</sup>	152.06 <sup>b</sup>	17.75 <sup>a</sup>	9.64 <sup>a</sup>	10.65 <sup>b</sup>	61.95 <sup>b</sup>
	W3N1	43.45 <sup>b</sup>	22.07 <sup>a</sup>	27.79 <sup>ab</sup>	150.23 <sup>b</sup>	17.84 <sup>a</sup>	9.06 <sup>a</sup>	11.41 <sup>ab</sup>	61.69 <sup>b</sup>
	W3N2	47.01 <sup>a</sup>	22.15 <sup>a</sup>	32.40 <sup>a</sup>	172.55 <sup>a</sup>	16.96 <sup>a</sup>	8.35 <sup>a</sup>	14.65 <sup>a</sup>	65.03 <sup>a</sup>
	W3N3	44.34 <sup>b</sup>	23.03 <sup>a</sup>	27.69 <sup>ab</sup>	160.58 <sup>ab</sup>	17.34 <sup>a</sup>	9.01 <sup>a</sup>	13.88 <sup>a</sup>	62.82 <sup>ab</sup>
2017—2018	W1N1	38.76 <sup>b</sup>	18.89 <sup>a</sup>	25.57 <sup>b</sup>	132.34 <sup>b</sup>	17.44 <sup>a</sup>	8.50 <sup>a</sup>	14.52 <sup>ab</sup>	59.54 <sup>b</sup>
	W1N2	42.34 <sup>b</sup>	19.43 <sup>a</sup>	24.83 <sup>b</sup>	153.63 <sup>b</sup>	17.62 <sup>a</sup>	8.09 <sup>a</sup>	10.34 <sup>b</sup>	63.95 <sup>ab</sup>
	W1N3	43.34 <sup>ab</sup>	20.06 <sup>a</sup>	27.06 <sup>ab</sup>	140.89 <sup>b</sup>	18.73 <sup>a</sup>	8.67 <sup>a</sup>	11.69 <sup>b</sup>	60.90 <sup>b</sup>
	W2N1	40.45 <sup>b</sup>	19.02 <sup>a</sup>	22.27 <sup>b</sup>	143.11 <sup>b</sup>	17.17 <sup>a</sup>	8.08 <sup>a</sup>	14.00 <sup>ab</sup>	60.76 <sup>b</sup>
	W2N2	45.23 <sup>ab</sup>	20.01 <sup>a</sup>	29.76 <sup>ab</sup>	168.21 <sup>ab</sup>	17.18 <sup>a</sup>	7.60 <sup>a</sup>	11.31 <sup>b</sup>	63.91 <sup>ab</sup>
	W2N3	43.23 <sup>ab</sup>	21.32 <sup>a</sup>	28.38 <sup>ab</sup>	154.57 <sup>b</sup>	17.47 <sup>a</sup>	8.61 <sup>a</sup>	11.47 <sup>b</sup>	62.45 <sup>ab</sup>
	W3N1	42.87 <sup>a</sup>	21.34 <sup>a</sup>	25.38 <sup>b</sup>	156.06 <sup>b</sup>	17.45 <sup>a</sup>	8.69 <sup>a</sup>	10.33 <sup>b</sup>	63.53 <sup>ab</sup>
	W3N2	47.65 <sup>a</sup>	22.14 <sup>a</sup>	32.96 <sup>a</sup>	182.80 <sup>a</sup>	17.77 <sup>a</sup>	8.26 <sup>a</sup>	15.81 <sup>a</sup>	68.17 <sup>a</sup>
	W3N3	45.69 <sup>ab</sup>	24.43 <sup>a</sup>	24.35 <sup>b</sup>	173.54 <sup>a</sup>	17.71 <sup>a</sup>	9.47 <sup>a</sup>	15.56 <sup>a</sup>	67.26 <sup>a</sup>

累量和分配比例从大到小均为籽粒、茎+叶鞘、穗轴+颖壳、叶片。叶片氮素积累量最小,这可能是由于成熟期叶片衰老,叶片的养分转运到籽粒中。连续2年,与W1N1处理相比,W3N2处理下小麦茎+叶鞘、穗轴+颖壳和籽粒平均氮素积累量分别增加20.19%、27.65%和35.99%。从各器官氮素积累量分配比例来看,与W1N1处理相比,W3N2和W3N3处理下小麦穗轴+颖壳氮素积累量分配比例增加30.27%和25.43%;W3N2处理下小麦籽粒氮素积累量分配比例增加13.14%。因此,在小麦成熟期,W3N2处理更有利于小麦不同器官氮素积累和分配。

### 2.3.3 开花后小麦植株氮素的转运

由表4可以看出,2016—2017年,与W1N1相比,W3N2和W3N3处理下小麦营养器官氮素转运量提高49.80%和42.88%,小麦营养器官氮素转运率增加22.84%和21.64%,营养器官氮素转运对籽粒贡献率提高6.95%和6.72%。2017—2018年,与W1N1相比,W3N2和W3N3处理下小麦营养器官氮素转运量提高45.21%和38.36%,小麦营养器官氮素转运率增加18.97%和17.36%,营养器官氮素转运对籽粒贡献率提高5.51%和5.13%。由此可知,连续2年,与W1N1相比,W3N2和W3N3处理下小麦营养器官平均氮素转运量提高47.51%和40.62%,小麦营养器官平均氮素转运率增加20.91%

表4 滴灌水肥一体化对小麦开花后植株氮素转运的影响

Tab.4 Effects of drip fertigation on nitrogen translocation of wheat after anthesis

年份	处理	营养器官氮素转运量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	营养器官氮素转运率/%	营养器官氮素转运对籽粒贡献率/%
2016—2017	W1N1	99.72 <sup>b</sup>	51.93 <sup>b</sup>	77.36 <sup>b</sup>
	W1N2	121.74 <sup>b</sup>	57.92 <sup>b</sup>	82.39 <sup>ab</sup>
	W1N3	110.98 <sup>b</sup>	53.99 <sup>b</sup>	81.74 <sup>ab</sup>
	W2N1	100.86 <sup>b</sup>	52.27 <sup>b</sup>	71.30 <sup>b</sup>
	W2N2	121.55 <sup>b</sup>	56.33 <sup>b</sup>	72.99 <sup>b</sup>
	W2N3	113.02 <sup>b</sup>	54.23 <sup>b</sup>	75.32 <sup>b</sup>
	W3N1	124.84 <sup>b</sup>	58.57 <sup>b</sup>	80.42 <sup>ab</sup>
	W3N2	149.38 <sup>a</sup>	63.79 <sup>a</sup>	82.74 <sup>a</sup>
	W3N3	142.48 <sup>a</sup>	63.17 <sup>a</sup>	82.56 <sup>a</sup>
2017—2018	W1N1	105.20 <sup>b</sup>	53.92 <sup>b</sup>	79.49 <sup>b</sup>
	W1N2	129.16 <sup>b</sup>	59.86 <sup>b</sup>	81.07 <sup>ab</sup>
	W1N3	111.82 <sup>b</sup>	55.28 <sup>b</sup>	79.36 <sup>b</sup>
	W2N1	110.24 <sup>b</sup>	54.39 <sup>b</sup>	77.03 <sup>b</sup>
	W2N2	126.12 <sup>b</sup>	57.04 <sup>b</sup>	74.98 <sup>b</sup>
	W2N3	117.53 <sup>b</sup>	55.84 <sup>b</sup>	76.04 <sup>b</sup>
	W3N1	121.17 <sup>b</sup>	57.49 <sup>b</sup>	77.64 <sup>b</sup>
	W3N2	152.76 <sup>a</sup>	64.15 <sup>a</sup>	83.87 <sup>a</sup>
	W3N3	145.55 <sup>a</sup>	63.28 <sup>a</sup>	83.57 <sup>a</sup>

和19.50%,营养器官氮素转运对籽粒平均贡献率提高6.04%和6.12%。因此,滴灌方式下,W3N2处理更有利于小麦营养器官氮素的转运。

### 2.4 滴灌水肥一体化对小麦产量和产量构成的影响

由表5可知,2016—2017年,与W1N1处理相比,W3N2处理下小麦穗长和千粒质量分别增加11.67%和9.63%,W3N2和W3N3处理下小麦产量提高26.41%和10.90%。2017—2018年,与W1N1处理相比,W3N2处理下小麦穗长和千粒质量分别增加14.81%和14.76%,W3N2和W3N3处理下小麦产量提高37.35%和19.66%。由以上分析可知,连续2年,W3N2处理使小麦穗长和千粒质量分别增加13.24%和12.19%;W3N2和W3N3处理下小麦产量提高31.88%和15.28%。这说明小麦拔节期和灌浆期氮肥追施和灌水的水肥一体化增产效果较明显。

表5 滴灌水肥一体化对小麦产量及产量构成的影响

Tab.5 Effects of drip fertigation on wheat yield and yield composition

年份	处理	穗长/ cm	小穗 数/个	穗粒 数/个	千粒 质量/g	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
2016—2017	W1N1	6.34 <sup>b</sup>	18.29 <sup>a</sup>	36.25 <sup>a</sup>	45.89 <sup>b</sup>	8 924.56 <sup>c</sup>
	W1N2	6.51 <sup>b</sup>	18.83 <sup>a</sup>	37.28 <sup>a</sup>	47.45 <sup>b</sup>	9 640.09 <sup>bc</sup>
	W1N3	6.93 <sup>ab</sup>	19.34 <sup>a</sup>	38.12 <sup>a</sup>	48.23 <sup>ab</sup>	9 750.56 <sup>bc</sup>
	W2N1	6.45 <sup>b</sup>	18.63 <sup>a</sup>	37.34 <sup>a</sup>	46.78 <sup>b</sup>	9 430.45 <sup>c</sup>
	W2N2	6.83 <sup>ab</sup>	19.05 <sup>a</sup>	38.50 <sup>a</sup>	48.40 <sup>ab</sup>	9 855.78 <sup>bc</sup>
	W2N3	7.02 <sup>a</sup>	19.35 <sup>a</sup>	40.02 <sup>a</sup>	49.34 <sup>ab</sup>	9 860.67 <sup>ab</sup>
	W3N1	6.63 <sup>b</sup>	18.97 <sup>a</sup>	38.45 <sup>a</sup>	47.45 <sup>b</sup>	9 645.34 <sup>bc</sup>
	W3N2	7.08 <sup>a</sup>	20.07 <sup>a</sup>	41.56 <sup>a</sup>	50.31 <sup>a</sup>	11 281.67 <sup>a</sup>
	W3N3	6.82 <sup>ab</sup>	19.51 <sup>a</sup>	40.41 <sup>a</sup>	49.76 <sup>ab</sup>	9 897.45 <sup>a</sup>
2017—2018	W1N1	6.21 <sup>b</sup>	18.56 <sup>a</sup>	38.69 <sup>a</sup>	46.42 <sup>b</sup>	8 340.04 <sup>b</sup>
	W1N2	6.39 <sup>b</sup>	18.66 <sup>a</sup>	39.50 <sup>a</sup>	48.52 <sup>ab</sup>	9 660.56 <sup>b</sup>
	W1N3	6.58 <sup>b</sup>	19.56 <sup>a</sup>	40.67 <sup>a</sup>	49.77 <sup>ab</sup>	9 880.89 <sup>ab</sup>
	W2N1	6.49 <sup>b</sup>	18.67 <sup>a</sup>	39.98 <sup>a</sup>	47.76 <sup>b</sup>	9 560.78 <sup>b</sup>
	W2N2	6.73 <sup>b</sup>	19.02 <sup>a</sup>	40.28 <sup>a</sup>	48.67 <sup>ab</sup>	9 670.12 <sup>b</sup>
	W2N3	6.81 <sup>b</sup>	19.17 <sup>a</sup>	41.19 <sup>a</sup>	51.69 <sup>ab</sup>	9 886.78 <sup>ab</sup>
	W3N1	6.75 <sup>b</sup>	18.92 <sup>a</sup>	40.01 <sup>a</sup>	48.38 <sup>ab</sup>	9 660.45 <sup>b</sup>
	W3N2	7.13 <sup>a</sup>	21.31 <sup>a</sup>	43.01 <sup>a</sup>	53.27 <sup>a</sup>	11 455.03 <sup>a</sup>
	W3N3	7.05 <sup>a</sup>	19.12 <sup>a</sup>	41.43 <sup>a</sup>	50.03 <sup>ab</sup>	9 979.56 <sup>a</sup>

## 3 讨论

### 3.1 滴灌水肥一体化对小麦干物质积累、转运和产量的影响

合适的水肥配比可有效发挥肥效,促进作物对肥料的吸收与利用,从而促进作物干物质和产量的提高,相反过量的水肥对作物的生长和产量产生抑制作用。文卿琳等<sup>[17]</sup>研究发现,施氮量过大,小麦贪青晚熟影响产量,通过减少生育后期灌水量,可以

促进干物质向籽粒的转运,加速植株成熟,提高产量。适量施氮促进冬小麦干物质积累,使叶片、茎和鞘的花前贮存干物质在花后向籽粒中转移增多,但在灌水条件下,施氮量过多不利于开花前营养器官贮存的干物质转移<sup>[8-9]</sup>。高水高氮处理植株营养生长过旺,抑制生殖生长,使穗的干物质积累减小<sup>[10]</sup>。不同水分处理中,水分亏缺时增施氮肥有利于小麦提前进入直线增长期,利于小麦干物质积累。适量氮素和水分能促进穗部干物质积累量的提高,利于产量形成,但过高的氮素并不会使穗干物质质量增加,反而对其有抑制作用<sup>[11]</sup>。本研究发现,小麦植株干物质积累量随灌水的增加而增大,随施氮量的增加而减小,适量的氮素和灌水能够促进小麦干物质的积累、分配和向籽粒的运转。这说明合适的水肥配比能够促进小麦的生长发育,在生殖生长阶段,营养器官的干物质较好地运转到穗部和籽粒,更有利于小麦产量的形成。

### 3.2 滴灌水肥一体化对小麦氮素积累、转运和产量的影响

在作物生长过程中,氮素以光合同化物的形式积累,氮素的积累与转运与营养物质的积累与转运密切相关,水肥互作可以促进作物对氮素的吸收、分配和转运,一方面水能促进作物对氮素的吸收,同时影响氮素的分配和转运;另一方面,施氮可以在一定程度上缓解水分亏缺对产量的影响<sup>[18-20]</sup>。本研究发现,适度的氮肥和灌水能够促进小麦营养器官氮素的积累、分配和转运。土壤水分状况是影响小麦氮素吸收、积累及转运的重要因素之一,水分亏缺能够显著降低小麦氮素吸收量、氮素利用效率和籽粒产量<sup>[21-23]</sup>。张永丽等<sup>[14]</sup>研究认为,小麦开花后土壤含水率过高会使其营养器官氮素向籽粒的转运量和转运率降低;冬小麦不同生育期中度和重度干旱胁迫能减少冬小麦氮素吸收量,并降低花前贮藏氮素向籽粒中的转运量<sup>[15-16]</sup>。同时研究也表明,小麦植株氮素积累量随生育进程推进而不断增加,至成熟期达峰值<sup>[24]</sup>。但也有学者认为,成熟期比开花期氮素积累量有所下降<sup>[25-26]</sup>。本研究发现,小麦植株氮素积累量随生育进程推进而不断增加,至成熟期达到最大值,增加灌水促进小麦植株氮素的积累和

转运,但氮肥量过大(270 kg/hm<sup>2</sup>)会降低小麦植株氮素积累、转运以及营养器官氮素转运对籽粒贡献率。因此,在小麦生长发育中,适度的氮肥和灌水有利于植株氮素积累和氮素向籽粒中转运,提高小麦产量。

## 4 结论

(1)连续2年,与W1N1处理相比,W3N2处理下小麦开花期植株平均干物质积累量增加32.11%,小麦成熟期植株平均干物质积累量提高13.34%。在小麦成熟期,与W1N1处理相比,W3N2处理提高了不同器官平均干物质积累量和分配比例。从小麦植株干物质转运来看,W3N2处理下小麦营养器官平均干物质转运量提高48.66%,小麦营养器官平均干物质转运率增加56.34%,营养器官干物质转运对籽粒平均贡献率提高42.93%。

(2)从小麦整个生育期来看,氮素积累量呈逐渐增加的趋势,在成熟期达到最大值。与W1N1处理相比,W2N3、W3N2和W3N3处理下小麦开花期植株平均氮素积累量分别提高12.84%、21.98%和17.67%,W2N2、W2N3、W3N2和W3N3处理下小麦成熟期植株平均氮素积累量分别增加11.15%、15.82%、20.30%和18.15%。在小麦成熟期,与W1N1处理相比,W3N2处理下小麦茎+叶鞘平均氮素积累量提高20.19%,小麦穗轴+颖壳平均氮素积累量增加27.65%,小麦籽粒平均氮素积累量提高35.99%。与W1N1相比,W3N2和W3N3处理下小麦营养器官平均氮素转运量增加47.51%和40.62%,小麦营养器官平均氮素转运率提高20.91%和19.50%,小麦营养器官氮素转运对籽粒平均贡献率增加6.04%和6.12%。

(3)与W1N1处理相比,W3N2和W3N3处理下小麦平均产量分别增加31.88%和15.28%。综合小麦干物质和氮素积累、转运变化规律得出,在滴灌水肥一体化下,W3N2处理(即小麦施纯氮240 kg/hm<sup>2</sup>,底施60%纯氮,拔节期追施25%纯氮和灌浆期追施15%纯氮,同时在拔节期、开花期和灌浆期各进行1次灌水的水肥一体化处理)能够促进小麦营养器官干物质和氮素的积累与转运及产量的提高。

## 参 考 文 献

- [1] 徐恒永,赵振东,刘建军,等.群体调控与氮肥运筹对强筋小麦济南17号产量和品质的影响[J].麦类作物学报,2002,22(1):56-62.  
XU Hengyong, ZHAO Zhendong, LIU Jianjun, et al. Effects of plant population regulation and nitrogen application on grain yield and quality of winter wheat Jinan 17 [J]. Journal of Triticeae Crops, 2002, 22(1): 56-62. (in Chinese)
- [2] 王月福,于振文,李尚霞,等.氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J].麦类作物学报,2002,22(2):55-59.  
WANG Yuefu, YU Zhenwen, LI Shangxia, et al. Effect of nitrogen nutrition on carbon assimilation and transfer and yield after wheat anthesis [J]. Journal of Triticeae Crops, 2002, 22(2): 55-59. (in Chinese)

- [3] 韩立杰, 董伟欣, 张月辰. 不同水肥处理对小麦冠层结构、产量和籽粒品质的影响 [J]. 浙江农业学报, 2020, 32(6): 953-962.  
HAN Lijie, DONG Weixin, ZHANG Yuechen. Effects of different water and fertilizer treatments on canopy structure, yield and grain quality of wheat [J]. Acta Agricolae Zhejiangensis, 2020, 32(6): 953-962. (in Chinese)
- [4] DESAI R M, BHATIA C R. Nitrogen uptake and nitrogen harvest index in durum wheat cultivars varying in their grain protein concentration [J]. Euphytica, 1978, 27(2): 561-566.
- [5] 全锦, 孙敏, 任爱霞, 等. 高产小麦品种植株干物质积累运转、土壤耗水与产量的关系 [J]. 中国农业科学, 2020, 53(17): 3467-3478.  
TONG Jin, SUN Min, REN Aixia, et al. Relationship between plant dry matter accumulation, translocation, soil water consumption and yield of high-yielding wheat cultivars [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(17): 3467-3478. (in Chinese)
- [6] 沈建辉, 戴廷波, 荆奇, 等. 施氮时期对专用小麦干物质和氮素积累、运转及产量和蛋白质含量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2004, 24(1): 55-58.  
SHEN Jianhui, DAI Tingbo, JING Qi, et al. Effect of nitrogen topdressing time on the accumulation and transfer of nitrogen, yield and protein content in specialty wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2004, 24(1): 55-58. (in Chinese)
- [7] 张松超, 陈慧, 黄振江, 等. 水氮耦合对滴灌春小麦干物质积累分配与运转规律的影响 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45(19): 38-42.  
ZHANG Songchao, CHEN Hui, HUANG Zhenjiang, et al. Effects of water and nitrogen coupling on dry matter accumulation, distribution and transferring regularity of spring wheat under drip irrigation [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(19): 38-42. (in Chinese)
- [8] 蔡瑞国, 张迪, 张敏, 等. 雨养和灌溉条件下施氮量对小麦干物质积累和产量的影响 [J]. 麦类作物学报, 2014, 34(2): 194-202.  
CAI Ruiguo, ZHANG Di, ZHANG Min, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation and grain yield of winter wheat under irrigated and rainfed conditions [J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(2): 194-202. (in Chinese)
- [9] ABDEL-GHANI A H, AL-DALAIN S A, OWAIS S J, et al. Effect of water deficit and soil nitrogen on dry matter and nitrogen accumulation and mobilization in durum wheat under semi-arid environment [J]. Jordan Journal of Agricultural Sciences, 2013, 9(4): 457-474.
- [10] 马耕, 张盼盼, 王晨阳, 等. 高产小麦花后植株氮素累积、转运和产量的水氮调控效应 [J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 798-805.  
MA Geng, ZHANG Panpan, WANG Chenyang, et al. Regulation effect of irrigation and nitrogen on post-anthesis nitrogen accumulation, translocation and grain yield of high-yield wheat [J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(6): 798-805. (in Chinese)
- [11] 李国强, 汤亮, 张文字, 等. 不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析 [J]. 作物学报, 2009, 35(12): 2258-2265.  
LI Guoqiang, TANG Liang, ZHANG Wenyu, et al. Dynamic analysis on response of dry matter accumulation and partitioning to nitrogen fertilizer in wheat cultivars with different plant types [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(12): 2258-2265. (in Chinese)
- [12] 王秀英. 不同水氮条件对燕麦氮素吸收转运和积累的影响 [J]. 西南师范大学学报, 2014, 39(11): 101-107.  
WANG Xiuying. Effect of different water and nitrogen condition on nitrogen absorption, translocation and accumulation of oat [J]. Journal of Southwest China Normal University, 2014, 39(11): 101-107. (in Chinese)
- [13] 郭丽, 王丽英, 张彦才, 等. 滴灌水肥一体化下施氮量对小麦氮素吸收及土壤硝态氮含量的影响 [J]. 华北农学报, 2017, 32(3): 207-213.  
GUO Li, WANG Liying, ZHANG Yancai, et al. Effects of nitrogen amount on nitrogen absorption of wheat and soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  content under drip fertigation [J]. Acta Agricolae Boreali-Sinica, 2017, 32(3): 207-213. (in Chinese)
- [14] 张永丽, 于振文. 灌水量对小麦氮素吸收、分配、利用及产量与品质的影响 [J]. 作物学报, 2008, 34(5): 870-878.  
ZHANG Yongli, YU Zhenwen. Effects of irrigation amount on nitrogen uptake, distribution, use, and grain yield and quality in wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(5): 870-878. (in Chinese)
- [15] 樊小林, 李玲, 何文勤, 等. 氮肥、干旱胁迫、基因型差异对冬小麦吸氮量的效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 131-137.  
FAN Xiaolin, LI Ling, HE Wenqin, et al. Effect of nitrogen fertilizer, water stress and the genotypes on nitrogen uptake of winter wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(2): 131-137. (in Chinese)
- [16] 刘恩科, 梅旭荣, 龚道枝, 等. 不同生育时期干旱对冬小麦氮素吸收与利用的影响 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(5): 555-562.  
LIU Enke, MEI Xurong, GONG Daozhi, et al. Effects of drought on N absorption and utilization in winter wheat at different developmental stages [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(5): 555-562. (in Chinese)
- [17] 文卿琳, 柳伟祥. 不同灌水和施肥处理对春小麦产量的影响 [J]. 农业科学研究, 2006, 27(2): 26-29.  
WEN Qinglin, LIU Weixiang. The effects of different irrigation and fertilization treatments on the spring wheat yield [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2006, 27(2): 26-29. (in Chinese)
- [18] 臧贺藏, 刘云鹏, 曹莲, 等. 水氮限量供给下两个高产小麦品种氮素吸收与利用特征 [J]. 麦类作物学报, 2012, 32(3): 503-509.  
ZANG Hecang, LIU Yunpeng, CAO Lian, et al. Nitrogen absorption and utilization characteristics of two high-yield winter wheat cultivars under limited irrigation and nitrogen supply [J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(3): 503-509. (in Chinese)
- [19] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 水氮处理对冬小麦生长、产量和水氮利用效率的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1367-1373.  
LI Li, HONG Jianping, WANG Hongting, et al. Effects of watering and nitrogen fertilization on the growth, grain yield, and water- and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1367-1373. (in Chinese)
- [20] 张忠学, 刘明, 齐智娟. 喷灌条件下水氮用量对玉米氮素吸收转运的影响 [J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 299-308.  
ZHANG Zhongxue, LIU Ming, QI Zhijuan. Effect of water nitrogen dosage on nitrogen absorption and transformation of maize under sprinkler irrigation condition [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 299-308. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190833&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190833&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.033. (in Chinese)



- [20] 王转卫. 基于介电频谱与光谱技术的水果内部品质无损检测方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [21] 中华人民共和国农业部. 水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法: NY/T 2637—2014[S]. 北京: 中国标准出版社,2014.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 食品中总酸的测定: GB/T 12456—2008[S]. 北京: 中国标准出版社,2008.
- [23] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社,2017.
- [24] ELMASRY G, WANG M, ELSAYED A, et al. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(1): 98–107.
- [25] LI Jiangbo, HUANG Wenqian, ZHAO Chunjiang, et al. A comparative study for the quantitative determination of soluble solids content, pH and firmness of pears by Vis/Nir spectroscopy[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(2): 324–332.
- [26] 李江波, 彭彦昆, 陈立平, 等. 近红外高光谱图像结合 CARS 算法对鸭梨 SSC 含量定量测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1264–1269.  
LI Jiangbo, PENG Yankun, CHEN Liping, et al. Near-infrared hyperspectral imaging combined with CARS algorithm to quantitatively determine soluble solids content in “Ya” pear[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1264–1269. (in Chinese)
- [27] YE S F, WANG D, MIN S G. Successive projections algorithm combined with uninformative variable elimination for spectral variable selection[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2008, 91(2): 194–199.
- [28] 刘燕德, 肖怀春, 孙旭东, 等. 柑桔叶片黄龙病光谱特征选择及检测模型[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(3): 180–187.  
LIU Yande, XIAO Huaichun, SUN Xudong, et al. Spectral feature selection and discriminant model building for citrus leaf Huanglongbing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(3): 180–187. (in Chinese)

## (上接第 282 页)

- [21] 范雪梅, 戴廷波, 姜东, 等. 花后干旱与渍水下氮素供应对小麦碳氮运转的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 63–67.  
FAN Xuemei, DAI Tingbo, JIANG Dong, et al. Effects of nitrogen rates on carbon and nitrogen assimilate translocation in wheat grown under drought and water logging from anthesis to maturity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 63–67. (in Chinese)
- [22] 王朝辉, 王兵, 李生秀. 缺水与补水对小麦氮素吸收及土壤残留氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1339–1343.  
WANG Zhaohui, WANG Bing, LI Shengxiu. Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1339–1343. (in Chinese)
- [23] LI F S, KANG S Z, ZHANG J H, et al. Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment, water status and applied nitrogen on water and nitrogen-use efficiencies of wheat [J]. *Plant and Soil*, 2003, 254(2): 279–289.
- [24] ZHU X K, GUO W S, FENG C N, et al. Nitrogen absorption and utilization differences among wheat varieties for different enduses [J]. *Plant Nutrition & Fertilizing Science*, 2005, 11(2): 148–154.
- [25] SCHENK M K. Regulation of nitrogen uptake on the whole plant level [J]. *Plant and Soil*, 1996, 181(1): 131–137.
- [26] 侯有良, O'BRIEN L, 钟改荣. 小麦不同器官氮素累积分布动态规律的研究[J]. *作物学报*, 2001, 27(4): 493–499.  
HOU Youliang, O'BRIEN L, ZHONG Gairong. Study on the dynamic changes of the distribution and accumulation of nitrogen in different plant parts of wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(4): 493–499. (in Chinese)

## (上接第 293 页)

- [40] 梁建财, 史海滨, 李瑞平, 等. 覆盖对盐渍土壤冻融特性与秋浇灌水质量的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 98–105.  
LIANG Jiancai, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of mulching on salinized soil freezing and thawing characteristics and autumn irrigation quality[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 98–105. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150415&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150415&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.015. (in Chinese)
- [41] 蔡太义, 张合兵, 黄会娟, 等. 不同量秸秆覆盖对春玉米光合生理的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(11): 2128–2135.  
CAI Taiyi, ZHANG Hebing, HUANG Huijuan, et al. Effects of cropping systems using straw mulching on photosynthetic physiology of spring maize during different rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2128–2135. (in Chinese)
- [42] 杨长刚, 柴守玺, 常磊. 半干旱雨养区不同覆膜方式对冬小麦土壤水分利用及产量的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(8): 2676–2685.  
YANG Changgang, CHAI Shouxi, CHANG Lei. Influences of different plastic film mulches on soil water use and yield of winter wheat in semiarid rain-fed region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(8): 2676–2685. (in Chinese)