

# 测墒滴灌下不同氮肥水平对冬小麦光合特性及氮素转运的影响

张黛静,宗洁静,马建辉,杨雪倩,杨逗逗,胡晓

(河南师范大学 生命科学学院,河南 新乡 453007)

**摘要:**采取裂区设计,探讨测墒滴灌下不同氮肥水平对冬小麦不同生育期光合特性与氮素积累转运的变化特征.其中,氮肥为主区,设 3 个水平( $N_1$ :100 kg·hm<sup>-2</sup>, $N_2$ :250 kg·hm<sup>-2</sup>, $N_3$ :350 kg·hm<sup>-2</sup>);滴灌为副区,设 3 个水平( $W_0$ :滴灌底墒水, $W_1$ :滴灌底墒水+拔节水, $W_2$ :滴灌底墒水+拔节水+开花水).结果表明:相同滴灌水平下,小麦最大光化学效率( $F_v/F_m$ )在开花期达到最高, $N_2$  处理高于  $N_1$ , $N_3$  处理;小麦叶绿素含量全生育期均表现为  $N_2$ , $N_3$  显著高于  $N_1$  处理;氮素总积累量、氮素籽粒积累量在  $N_2$  水平下最高, $N_2W_2$  处理下营养器官氮素转运量、对籽粒的贡献率最高;相同氮肥处理下,氮素总积累量、氮素籽粒积累量以  $W_2$  水平最高,产量在  $N_2W_2$  最高,为 6 684.71 kg·hm<sup>-2</sup>.综合籽粒产量、氮素积累与转运和光合特性来看,在本试验条件下,250 kg·hm<sup>-2</sup> 的施氮量、滴灌量为 214.52 mm 为最优的节水节氮、高产模式.

**关键词:**冬小麦;测墒滴灌;光合特性;氮素积累与转运

**中图分类号:**O413

**文献标志码:**A

华北地区是我国主要小麦生产区,其高产稳产对全国粮食生产安全具有重要意义<sup>[1]</sup>.水分、氮肥是影响作物生长与产量的两个主要因素.施用化肥,尤其氮肥,是一项主要保证小麦高产稳产的农作措施,而黄淮海平原地区冬小麦一夏玉米轮作施氮量普遍过高,平均为 530 kg·hm<sup>-2</sup>,部分地区超过 600 kg·hm<sup>-2</sup>,远超出农作物吸收量<sup>[2-3]</sup>.过量施氮引发了土壤氮素盈余增加,导致了氮肥资源浪费严重、污染环境等问题发生<sup>[4]</sup>.与此同时,黄淮海平原小麦生产中常采用大水漫灌、传统畦灌的方式,导致灌水过多,水资源浪费严重<sup>[5]</sup>.因此,合理的水、氮运筹是实现作物产量与资源利用效率协同提高的重要措施.

前人研究表明:水分和氮素均能影响小麦氮素吸收与转运<sup>[6]</sup>,合理的水分和适量增施氮肥一定程度上能增强小麦叶片光合性能,促进氮素有效利用,提高籽粒产量<sup>[7]</sup>.郭天财等发现:适宜的施氮水平能够提高小麦花后叶绿素含量、光合速率,使最大光化学效率( $F_v/F_m$ )增加 6.19%~8.3%<sup>[8]</sup>.然而,农田过度缺水或过量的灌溉对小麦的氮素吸收均有不利影响<sup>[6,9]</sup>.雷均杰等研究表明:适量施用氮肥可增加滴灌小麦的产量;但施氮量过大,产量则降低<sup>[10]</sup>.戴忠民等研究结果显示:与旱作栽培相比,节水灌溉和常规灌溉有利于小麦开花期植株营养器官对氮素的吸收与转运<sup>[11]</sup>.

不同施氮或灌溉单个因素对小麦花后光合特性及氮素转运的探究已有较多报道<sup>[12-13]</sup>,而测墒滴灌等节水栽培条件下,施氮对小麦不同生育期光合特性、氮素转运及氮素利用、收获指数的水氮互作的影响则少见报道.本试验在测墒滴灌条件下,研究了不同施氮水平对“周麦 22”生长过程中叶绿素荧光特性、氮素转运及产量等的影响,旨在为华北地区冬小麦节水节肥高产栽培提供依据.

**收稿日期:**2019-01-25;**修回日期:**2020-02-10.

**基金项目:**2018 河南省重点研发与推广专项(182102110382);“十三五”国家重点研发计划项目课题(2017YFD0301101;2018YFD0300703).

**作者简介(通信作者):**张黛静(1974—),女,河南新乡人,河南师范大学副教授,博士,主要从事小麦栽培生理研究,E-mail:zdjdai@163.com.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2015—2016 年在河南师范大学小麦试验田(35°19'N, 113°54'E)进行,土壤质地为中壤土,土壤质量浓度  $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 供试土壤的田间持水量为 24%, 土壤 pH 值约 7.6, 播种前试验地 0~20 cm 土层土壤养分状况为:有机质质量分数  $2.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮质量分数  $1.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全磷质量分数  $1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效氮质量分数  $30.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### 1.2 试验设计

试验为裂区设计,氮肥为主区,分别为:(1) $N_1$   $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (底肥 N  $40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 拔节期 N  $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ );(2) $N_2$   $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (底肥 N  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 拔节期 N  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ );(3) $N_3$   $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (底肥 N  $140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 拔节期 N  $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ).滴灌为副区,分别为:(1) $W_0$ , 滴灌底墒水;(2) $W_1$ , 滴灌底墒水+拔节水;(3) $W_2$ , 滴灌底墒水+拔节水+开花水;采取测墒补灌,补灌前 3 d 取土样测土壤含水量,以达到 0~100 cm 土层土壤相对含水量为田间持水量的 75%为目标计算补灌量<sup>[14]</sup>.生育期补灌量如表 1 所示.

供试材料为半冬性小麦品种周麦 22,氮、磷、钾肥分别选用尿素、过磷酸钙和硫酸钾,播前底施磷肥折合  $P_2O_5$   $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $K_2O$   $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ .于 2015 年 10 月 16 日机械播种,2016 年 5 月 30 日收获,行间距 20 cm,基本苗  $150 \times 10^4$  株  $\cdot \text{hm}^{-2}$ ,小麦全生育期按高产田统一管理.

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 旗叶叶绿素及最大光化学效率的测定

于小麦拔节期、抽穗期、开花期和灌浆期,上午 9:00—11:00,选取 5 片生长一致的旗叶,使用 SPAD-502 叶绿素仪测定其 SPAD 值;用 Pocket PEA 叶绿素荧光测定光系统 II 的最大光能转化效率  $F_v/F_m$ .

#### 1.3.2 植株全氮含量及氮素转运测定

于拔节期、抽穗期、开花期和成熟期,用凯氏定氮法测定植株全氮含量,并计算植株氮素积累、转运及籽粒氮素积累贡献特征,相关计算公式如下:

营养器官氮素转运量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) = 开花期营养器官氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量;

营养器官氮素运转率(%) = 营养器官氮素转运量 / 开花期营养器官氮素积累量  $\times 100\%$ ;

营养器官氮素贡献率(%) = 营养器官氮素转运量 / 成熟期籽粒氮素积累量  $\times 100\%$ ;

氮素总积累量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) = 成熟期单株干物质量  $\times$  成熟期植株含氮量  $\times$  成熟期群体数 / 100;

氮素利用率(%) = 籽粒产量 / 氮素总积累量;

氮素收获指数(%) = 成熟期籽粒氮素积累量 / 氮素总积累量  $\times 100\%$ .

#### 1.3.3 测产及考种

成熟时收获 1 m 双行内的麦穗,随机选取 30 个长势一致的麦穗,进行考种.

### 1.4 数据处理

采用 SPSS13.0 统计软件对数据进行方差分析,使用 Microsoft Excel 2010 对数据进行处理与做图.

## 2 结果分析

### 2.1 不同滴灌和氮肥下冬小麦生育时期最大光化学效率

由表 2 可知,整个生育时期内,小麦叶片的最大光化学效率( $F_v/F_m$ )呈先升高再降低趋势,开花期最高, $N_2W_1$ ,  $N_2W_2$  处理下  $F_v/F_m$  最高.同一氮肥水平,灌浆期  $F_v/F_m$  表现为  $W_1$  处理高于  $W_0$ ,  $W_2$  处理.相同滴

表 1 生育期测墒滴灌量

Tab.1 Irrigation of different treatments

处理	不同时期滴灌量/mm			总滴灌量/mm
	播前	拔节期	开花期	
$N_1W_0$	39.94	0	0	39.94
$N_1W_1$	39.94	36.58	0	76.52
$N_1W_2$	39.94	36.58	76.82	153.34
$N_2W_0$	60.14	0	0	60.14
$N_2W_1$	60.14	57.79	0	117.93
$N_2W_2$	60.14	57.79	96.58	214.52
$N_3W_0$	92.96	0	0	92.96
$N_3W_1$	92.96	60.27	0	153.23
$N_3W_2$	92.96	60.27	99.53	252.76

灌条件下,拔节期  $N_2$  的  $F_v/F_m$  显著高于  $N_1, N_3$  处理 ( $P < 0.05$ ),  $N_1$  与  $N_3$  处理间无显著差异;  $N_2$  处理的  $F_v/F_m$  在抽穗期、开花期和灌浆期均高于  $N_1, N_3$  处理,但未达显著水平。

表 2 不同滴灌和施氮处理下小麦生育时期最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ )

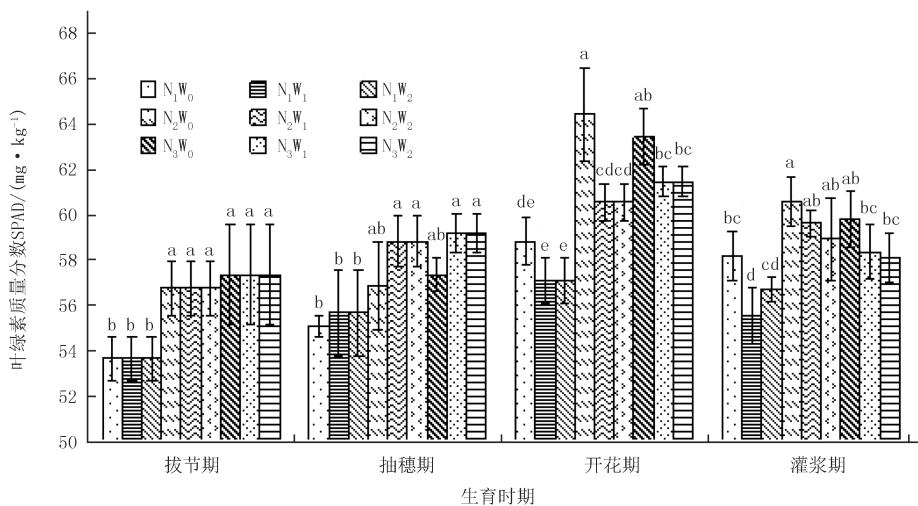
Tab.2 Maximum photochemical efficiency of flag leaf during wheat growth period under different drip irrigation and nitrogen fertilizer treatment

处理	拔节期	抽穗期	开花期	灌浆期
$N_1 W_0$	0.800±0.006b	0.811±0.023a	0.822±0.005ab	0.820±0.003ab
$N_1 W_1$	0.800±0.006b	0.807±0.017a	0.832±0.004ab	0.821±0.010ab
$N_1 W_2$	0.800±0.006b	0.807±0.017a	0.832±0.004ab	0.813±0.005b
$N_2 W_0$	0.820±0.006a	0.827±0.005a	0.830±0.010ab	0.824±0.003ab
$N_2 W_1$	0.820±0.006a	0.827±0.007a	0.837±0.009a	0.829±0.004a
$N_2 W_2$	0.820±0.006a	0.827±0.007a	0.837±0.009a	0.819±0.005ab
$N_3 W_0$	0.789±0.008b	0.801±0.009a	0.817±0.021b	0.812±0.017b
$N_3 W_1$	0.789±0.008b	0.803±0.058a	0.829±0.008ab	0.820±0.001ab
$N_3 W_2$	0.789±0.008b	0.803±0.058a	0.829±0.008ab	0.815±0.004ab

注:同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ),下表同。

### 2.2 不同滴灌和氮肥下冬小麦生育时期叶绿素含量

由图 1 可知,从拔节期到灌浆期,不同滴灌氮肥水平的冬小麦叶绿素质量分数变化规律相同,随着生育期的进行叶绿素质量分数也随之增加,在开花期达到峰值,随之降低,  $N_2 W_0$  处理叶绿素质量分数达到最大值,为 64.43。相同滴灌处理,各生育期均表现为  $N_2, N_3 > N_1$ , 差异显著 ( $P < 0.05$ )。同一氮肥条件下,拔节、抽穗期处理之间叶绿素质量分数未达显著;  $W_0$  处理的小麦叶绿素质量分数在开花期、灌浆期均高于  $W_1, W_2$  处理 ( $P < 0.05$ )。



注:图柱上不同字母表示同一时间不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图1 不同滴灌和施氮处理下冬小麦叶绿素质量分数

Fig.1 Chlorophyll content of winter wheat flag leaves under different drip irrigation and nitrogen fertilizer treatment

### 2.3 不同滴灌和氮肥下冬小麦生育期植株全氮含量

周麦 22 的植株氮含量的变化范围为 12.86~37.31  $mg \cdot kg^{-1}$ 。各处理的冬小麦植株全氮含量随生育期进行呈由高到低的规律,成熟期冬小麦植株全氮含量最低。拔节期,  $N_2 W_0$  水平下冬小麦植株全氮含量显著高于  $N_1 W_0$ 。抽穗期、开花期因拔节期追施氮肥和滴灌拔节水,其植株全氮含量表现出明显差异,在  $N_2, N_3$  水平下,滴灌拔节水的  $W_1$  处理的植株全氮含量均高于  $W_0$  处理,而  $N_1 W_0 > N_1 W_1$ ; 相同滴灌条件下,植株全氮

含量随着氮肥水平的增加逐渐提高,且  $N_3W_1, N_3W_0$  显著高于  $N_1W_1, N_1W_0$  ( $P < 0.05$ ). 成熟期,在  $N_3W_1$  处理下植株氮含量最高,  $N_3W_1 > N_3W_0 > N_3W_2$ , 差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ).

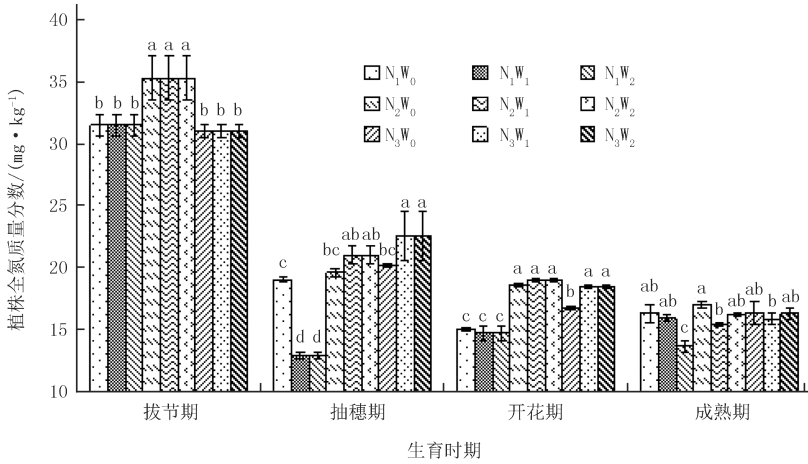


图2 不同滴灌和施氮处理下冬小麦生育期植株全氮质量分数

Fig.2 Total N content of winter wheat plant under different drip irrigation and nitrogen treatments

### 2.4 不同滴灌和氮肥下冬小麦花后营养器官氮素的转运及对籽粒贡献特征

表 3 可知,  $N_2W_2$  条件的营养器官氮素转运量达到最大.同一滴灌条件,营养器官氮素转运量表现为  $N_2 > N_3 > N_1$ , 差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ); 氮素转运效率在  $N_3$  水平最低 ( $W_1$  除外), 而对籽粒的贡献率  $N_2$  水平显著高于  $N_1, N_3$  水平 ( $W_0$  除外,  $P < 0.05$ ). 相同氮肥条件下, 不同滴灌之间,  $W_2$  条件的营养器官氮素转运量显著高于  $W_1, W_0$ ;

表 3 不同滴灌和施氮处理下冬小麦花后营养器官氮素转运及对籽粒贡献特征

Tab.3 Transportation of post-anthesis nitrogen and contribution to grain under different drip irrigation and nitrogen treatments

处理	营养器官氮素转运量/( $kg \cdot hm^{-2}$ )	氮素转运效率/%	氮素运转对籽粒贡献率/%
$N_1W_0$	$110.32 \pm 1.80d$	$83.65 \pm 1.01b$	$78.35 \pm 4.08d$
$N_1W_1$	$88.27 \pm 7.27e$	$59.45 \pm 2.49e$	$56.74 \pm 5.45f$
$N_1W_2$	$124.70 \pm 5.87c$	$84.08 \pm 0.93b$	$79.38 \pm 1.91cd$
$N_2W_0$	$134.65 \pm 0.88b$	$90.38 \pm 0.29a$	$91.69 \pm 2.49ab$
$N_2W_1$	$136.41 \pm 1.46b$	$69.70 \pm 0.28d$	$84.36 \pm 0.42cd$
$N_2W_2$	$161.38 \pm 1.19a$	$82.46 \pm 0.11bc$	$85.74 \pm 1.31bc$
$N_3W_0$	$114.15 \pm 0.88d$	$81.13 \pm 0.33c$	$93.39 \pm 5.94a$
$N_3W_1$	$130.85 \pm 0.74b$	$69.83 \pm 0.16d$	$82.35 \pm 2.65cd$
$N_3W_2$	$131.78 \pm 2.38b$	$70.32 \pm 0.71d$	$71.77 \pm 3.65e$

氮素转运对籽粒的贡献率, 表现为  $W_0 > W_2 > W_1$ , 差异显著 ( $P < 0.05$ ).

### 2.5 不同滴灌和施肥下冬小麦植株氮素利用效率和收获指数

由表 4 可以看出, 氮肥水平与滴灌处理及其交互作用对氮素总积累量、籽粒氮素积累量均达到极显著. 不同氮肥处理间的氮素总积累量、籽粒氮素积累量, 在  $N_2$  处理下最高, 在  $N_1$  处理最低. 不同滴灌处理, 氮素总积累量、籽粒氮素积累量随着滴灌量的增加逐渐增加, 以  $W_2$  最高.

施氮水平和滴灌处理及其交互作用对氮素利用率、氮素收获指数的影响均呈现极显著水平. 不同施氮水平间, 随着施氮量的增加氮素利用率、氮素收获指数下降, 在  $N_1$  水平下最高. 不同滴灌处理, 氮素利用率在  $W_2$  与  $W_0$  处理间无显著性差异, 均显著高于  $W_1$  处理; 氮素收获指数呈现出  $W_0 > W_2 > W_1$ , 差异显著 ( $P < 0.05$ ).

### 2.6 不同滴灌和施肥下冬小麦产量及其构成

由表 5 可知, 在相同氮肥水平和滴灌下,  $N_2$  处理的不孕小穗数最低;  $N_3W_2$  水平下穗粒数最高, 比  $N_2W_2, N_1W_2$  分别显著提高 5.54%、17.3%. 在同一氮肥水平下, 各滴灌处理的穗粒数依次表现为  $W_2 > W_1 > W_0$ , 差异显著 ( $P < 0.05$ ), 千粒质量表现为  $W_2 > W_1 > W_0$ , 差异显著, 在  $N_1W_2$  处理下千粒重最高. 产量在相同滴灌下,  $N_2$  处理显著高于  $N_1$  和  $N_3$  处理, 产量在  $N_2W_2$  水平达到最大值, 为  $6684.71 kg \cdot hm^{-2}$ , 与  $N_3W_2, N_1W_2$  差异不显著.

### 3 讨论与结论

氮素是叶绿素重要的组成部分,增加施氮量,叶绿素含量随之增加,有利于促进小麦生长发育<sup>[15-16]</sup>.研究表明:施氮水平在 0~240 kg·hm<sup>-2</sup>内,叶绿素含量随施氮水平提高而逐渐升高,继续加大施氮量,对光合速率和叶绿素的促进作用降低<sup>[17-18]</sup>.本试验中,在相同滴灌条件下,施氮量增加,N<sub>2</sub>处理的叶绿素含量高于N<sub>1</sub>处理,N<sub>3</sub>处理的叶绿素含量降低;相同施氮处理下不同滴灌量对小麦不同生育期光合特性的影响不一致,抽穗期的叶绿素含量在W<sub>1</sub>,W<sub>2</sub>处理高于W<sub>0</sub>处理,开花期与灌浆期叶绿素含量在W<sub>0</sub>显著高于W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>处理.相比于滴灌,施用氮肥对叶绿素含量影响较为明显,这与于振文等对不同灌水量小麦旗叶叶绿素含量在籽粒形成期与灌浆期处理间无显著差异的研究结果相符<sup>[19]</sup>.F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>代表PSⅡ最大光化学量子产量,0~240 kg·hm<sup>-2</sup>施氮量范围内,施氮量增加,小麦F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>也随之增加<sup>[20]</sup>.本试验中,小麦最大光化学效率F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>随生育时期的进行呈先上升再降低的规律,开花期达到峰值.氮肥水平为250 kg·hm<sup>-2</sup>时F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>最大.表明适量的施氮有利于提高冬小麦最大光化学效率和叶绿素含量,并促进光合反应.

小麦氮素利用率的高低取决于氮素的积累与转运<sup>[21]</sup>.段文学<sup>[22]</sup>等研究认为:增加施氮量,氮素利用效率表现为先上升后下降,植株对氮素吸收增多,而氮素向籽粒的转运效率会下降.李东方<sup>[23]</sup>等研究也表明:施氮能显著提高小麦植株对氮素的吸收量与氮素转运量并能增加籽粒的产量,但氮素利用效率降低.本研究中,相同氮肥水平下,氮素总积累量、籽粒氮积累量随滴灌量的增加而升高,W<sub>2</sub>处理达到最大;W<sub>2</sub>水平的氮素利用效率明显高于W<sub>1</sub>水平;同一滴灌处理下,氮素转运量、氮素转运率、氮素利用效率、氮素收获指数随氮肥水平增加逐渐下降,营养器官氮素转运量在

N<sub>2</sub>W<sub>2</sub>处理下达到最大,与前人研究一致.增加滴灌量与合理施用氮肥能显著提高植株氮素积累量,有利于水氮耦合,能有效提升氮素吸收及利用率,促进各器官花后氮素向籽粒中的转运.

表 5 不同滴灌和施氮处理下冬小麦产量及其构成因素

Tab.5 Wheat yield and its composition under different drip irrigation and nitrogen fertilizer treatment

处理	不孕小穗数/(粒/秆)	穗粒数/(粒/秆)	千粒质量/g	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )
N <sub>1</sub> W <sub>0</sub>	2.87±0.31a	36.60±0.20h	46.60±0.20b	4 689.09±149.43de
N <sub>1</sub> W <sub>1</sub>	2.80±0.20a	38.13±0.31g	46.87±0.70b	5 330.41±246.46c
N <sub>1</sub> W <sub>2</sub>	2.67±0.42ab	41.87±0.31d	50.35±0.33a	6 388.19±39.96a
N <sub>2</sub> W <sub>0</sub>	2.13±0.46bcd	39.00±0.20f	46.24±0.09b	4 873.27±114.35d
N <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	2.47±0.42abcd	43.11±0.19c	47.06±0.42b	6 015.42±195.38b
N <sub>2</sub> W <sub>2</sub>	1.93±0.23d	46.53±0.23b	49.36±0.32a	6 684.71±238.43a
N <sub>3</sub> W <sub>0</sub>	2.53±0.12abc	34.00±0.20i	48.38±0.86ab	4 404.87±151.40e
N <sub>3</sub> W <sub>1</sub>	2.47±0.12abcd	40.18±0.17e	49.14±1.21a	5 381.77±297.33c
N <sub>3</sub> W <sub>2</sub>	2.00±0.20cd	49.11±0.19a	49.52±2.96a	6 540.77±126.56a

有研究认为,与整个生育时期不灌水对比,拔节期灌水小麦产量提高了16.6%,拔节期、开花期灌水小麦产量提高25.6%<sup>[24]</sup>.金修宽<sup>[25]</sup>等认为:小麦的产量受到施氮与测墒补灌的影响,并且存在一定的阈值,当超过阈值时冬小麦产量无显著性变化.施氮为195 kg·hm<sup>-2</sup>,补灌量达到田间持水量70%时,其冬小麦产量达到最大.本试验中,在N<sub>2</sub>W<sub>2</sub>处理下产量达到最大,为6 684.71 kg·hm<sup>-2</sup>.同一滴灌条件下,产量表现为N<sub>2</sub>>N<sub>3</sub>>N<sub>1</sub>(除W<sub>0</sub>处理);相同氮肥水平下,产量表现为W<sub>2</sub>>W<sub>1</sub>>W<sub>0</sub>.施用氮肥在100~350 kg·hm<sup>-2</sup>内,随

表 4 不同滴灌和施氮处理下氮素利用率和收获指数的差异

Tab.4 Difference of nitrogen utilization and harvest index under different drip irrigation and nitrogen treatments

处理	氮素总积累量 (/kg·hm <sup>-2</sup> )	籽粒氮积累量 (/kg·hm <sup>-2</sup> )	氮素利用率/%	氮素收获指数/%
N <sub>1</sub>	186.32c	151.26b	29.66a	81.95a
N <sub>2</sub>	205.45a	165.62a	28.67b	81.56a
N <sub>3</sub>	195.79b	155.13b	28.55b	81.03b
W <sub>0</sub>	152.05b	136.82c	30.82a	90.14a
W <sub>1</sub>	217.44a	158.81b	25.64b	73.03c
W <sub>2</sub>	218.07a	176.38a	30.43a	81.37b
F 值 F-value				
N	28.02 **	20.11 **	3.65 **	9.25 **
W	440.81 **	143.08 **	81.68 **	3188.14 **
N * W	55.26 **	17.55 **	40.70 **	260.11 **

注: \*\*表示0.01显著水平.同列数值后不同小写字母表示0.05显著水平.

氮肥水平增加产量呈先增加后减少的规律,以  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  施氮水平最优,这与前人研究结果一致;随着滴灌量增加,产量也随之升高。本研究中,产量在滴灌底墒水、拔节水与开花水时达到最高。

本研究中,氮肥水平为  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  可显著改善小麦光合特性、促进营养器官氮素转运及对籽粒贡献率,同时有较高的氮素利用率。因此,施氮量为  $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,滴灌播前、拔节期和开花期水时,可获得小麦最高籽粒产量。

## 参 考 文 献

- [1] 蒿宝珍,张英华,姜丽娜,等.限水灌溉下追氮水平对冬小麦旗叶光合特性及物质运转的影响[J].麦类作物学报,2010,30(5):863-869.  
GAO B Z,ZHANG Y H,JIANG L N,et al.Effect of Topdressing Amount of Nitrogen on Photosynthetic Characteristics and Assimilates Transportation in Winter Wheat under Limited Irrigation[J].Journal of Triticeae Crops,2010,30(5):863-869.
- [2] 车升国,袁亮,李燕婷,等.我国主要麦区小麦氮素吸收及其产量效应[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):287-295.  
CHE S G,YUAN L,LI Y T,et al.N uptake and yield response of wheat in main wheat production regions of China[J].Plant Nutrition and Fertilizer Science,2016,22(2):287-295.
- [3] 巨晓棠,谷保静.氮素管理的指标[J].土壤学报,2017,54(2):281-296.  
JU X T,GU B J.Indexes of Nitrogen Management[J].Acta Pedologica Sinica,2017,54(2):281-296.
- [4] SHANG F,YANG P,LI Y,et al.Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(7):103-110.
- [5] 金修宽,马茂亭,赵同科,等.测墒补灌和施氮对冬小麦产量及水分、氮素利用效率的影响[J].中国农业科学,2018,51(7):1334-1344.  
JIN X K,MA M T,ZHAO T K,et al.Effects of Nitrogen Application on Yield,Water and Nitrogen Use Efficiency of Winter Wheat Under Supplemental Irrigation Based on Measured Soil Moisture Content[J].Scientia Agricultura Sinica,2018,51(7):1334-1344.
- [6] XU Z Z,YU Z W,WANG D,et al.Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes[J].Journal of Agronomy & Crop Science,2010,191(6):439-449.
- [7] 张黛静,王艳杰,陈倩青,等.不同耕作与培肥对小麦氮吸收效率、根效率及产量的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2018,46(5):85-91.  
ZHANG D J,WANG Y J,CHEN Q Q,et al.Effects of different tillage and fertilization on wheat nitrogen absorption efficiency,root efficiency and yield[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science),2018,46(5):85-91.
- [8] 郭天财,宋晓,马冬云,等.施氮水平对冬小麦旗叶光合特性的调控效应[J].作物学报,2007,33(12):1977-1981.  
GUO T C,SONG X,MA D Y,et al.Effects of Nitrogen Application Rates on Photosynthetic Characteristics of Flag Leaves in Winter Wheat? [J].Acta Agronomica Sinica,2007,33(12):1977-1981.
- [9] PALTA J A,KOBATA T,TURNER N C,et al.Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits[J].Crop Science,1994,34(1):118-124.
- [10] 雷钧杰,张永强,梁玉超,等.施氮量对滴灌冬小麦光合特性及产量的影响[J].新疆农业科学,2015,52(9):1576-1582.  
LEI J J,ZHANG Y Q,LIANG Y C,et al.Effects of Different Nitrogen Application Rates on Photosynthetic Characteristics and Yield of Winter Wheat under Drip Irrigation[J].Xinjiang Agricultural Sciences,2015,52(9):1576-1582.
- [11] 戴忠民,李妍,张红,等.不同灌溉处理对小麦花后氮素积累和转运的影响[J].麦类作物学报,2015,35(12):1712-1718.  
DAI Z M,LI Y,ZHANG H,et al.Effects of Different Irrigation Treatments on Nitrogen Accumulation and Translocation after Anthesis in Wheat[J].Journal of Triticeae Crops,2015,35(12):1712-1718.
- [12] 李升东,张卫峰,王法宏,等.施氮量对小麦氮素利用的影响[J].麦类作物学报,2016,36(2):223-230.  
LI S D,ZHANG W F,WANG F H,et al.Effect of Nitrogen Application Amount on Nitrogen Utilization of Wheat[J].Journal of Triticeae Crops,2016,36(2):223-230.
- [13] 王红光,于振文,张永丽,等.测墒补灌对小麦光合特性和干物质积累与分配的影响[J].应用生态学报,2011,22(10):2495-2503.  
WANG H G,YU Z W,ZHANG Y L,et al.Effects of supplemental irrigation based on measuring soil water content on wheat photosynthetic characteristics and dry matter accumulation and allocation[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(10):2495-2503.
- [14] 张黛静,杨逗逗,马建辉,等.测墒滴灌对氮肥调控下冬小麦水分利用效率及灌浆动态的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2017,45(1):51-59.  
ZHANG D J,YANG D D,MA J H,et al.Effect of Drip Irrigation and Nitrogen Regulation on WUE and Grain Filling of Winter Wheat Based on Soil Moisture Measurement[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science),2017,45(1):51-59.
- [15] 吴清丽,高茂盛,廖允成,等.氮素对冬小麦光合物质贮运及籽粒灌浆进程的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):120-124.  
WU Q L,GAO M S,LIAO X C,et al.Effect of nitrogen application on accumulation and transportation of photoassimilation and grain filling course[J].Agricultural Research in the Arid Areas,2009,27(2):120-124.
- [16] 薛丽华,赵连佳,陈兴武,等.施氮量对滴灌冬小麦光合特性、产量及氮素利用效率的影响[J].中国农学通报,2018,34(10):11-16.

- XUE L H,ZHAO L J,CHEN X W,et al.Effect of Nitrogen Application Rate on Photosynthetic Characteristics,Yield and Nitrogen Utilization Efficiency of Winter Wheat Under Drip Irrigation[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2018,34(10):11-16.
- [17] 王东,于振文,李延奇,等.施氮量对济麦20旗叶光合特性和蔗糖合成及籽粒产量的影响[J].作物学报,2007,33(6):903-908.  
WANG D,YU Z W,LI Y Q,et al.Effects of Nitrogen Fertilizer Rate on Photosynthetic Character,Sucrose Synthesis in Flag Leaves and Grain Yield of Strong Gluten Wheat Jimai 20[J].Acta Agronomica Sinica,2007,33(6):903-908.
- [18] 赵俊晔,于振文.施氮量对小麦旗叶光合速率和光化学效率、籽粒产量与蛋白质含量的影响[J].麦类作物学报,2006,26(5):92-96.  
ZHAO J Y,YU Z W.Effect of Nitrogen Fertilizer Rate on Photosynthetic Rate and Photochemical Efficiency of Flag Leaf,Grain Yield and Protein Content of Winter Wheat[J].Journal of Triticeae Crops,2006,26(5):92-96.
- [19] 于振文,元新华,田奇卓,等.水浇地冬小麦节水高产高效灌溉方案及生理基础[M].北京:中国农业科技出版社,2001:71-78.  
YU Z W,YUAN X H,TIAN Q Z,et al.Water-saving,high-yield and efficient irrigation schemes and physiological basis of winter wheat in irrigated land[M].Beijing:China Agricultural Science and Technology Press,2001:71-78.
- [20] 张元帅,冯伟,张海艳,等.遮阴和施氮对冬小麦旗叶光合特性及产量的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(9):1177.  
ZHANG Y S,FENG W,ZHANG H Y,et al.Effects of shading and nitrogen rate on photosynthetic characteristics of flag leaves and yield of winter wheat[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture,2016,24(9):1177.
- [21] LYU P,WANG J,GENG S,et al.Effects of Nitrogen Application on Photosynthetic Characteristics and Nitrogen Use Efficiency in Wheat after Rice[J].Agricultural Science & Technology,2017,18(05):771-776.
- [22] 段文学,于振文,张永丽,等.施氮量对旱地小麦氮素吸收转运和土壤硝态氮含量的影响[J].中国农业科学,2012,45(15):3040-3048.  
DUAN W X,YU Z W,ZHANG Y L,et al.Effects of Nitrogen Fertilizer Application Rate on Nitrogen Absorption,Translocation and Nitrate Nitrogen Content in Soil of Dryland Wheat[J].Scientia Agricultura Sinica,2012,45(15):3040-3048.
- [23] 李东方,李世清,李紫燕,等.冬小麦同化物、氮素转运量和转移效率对氮肥的反应[J].麦类作物学报,2006,26(5):106-112.  
LI D F,LI S Q,LI Z Y,et al.Response of Various Cultivars of Winter Wheat in Assimilative Matter and N Translocation before Anthesis to N Fertilizer[J].Journal of Triticeae Crops,2006,26(5):106-112.
- [24] 马耕,张盼盼,王晨阳,等.高产小麦花后植株氮素积累、转运和产量的水氮调控效应[J].麦类作物学报,2015,35(6):796-805.  
MA G,ZHANG P P,WANG C Y,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):796-805.
- [25] 金修宽,赵同科.测墒补灌和施氮对冬小麦产量及氮素吸收分配的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):233-239.  
JIN X K,ZHAO T K.Effects of Supplemental Irrigation Based on Soil Moisture Content Measuring and Nitrogen Fertilizer Application on Winter Wheat Yield,Nitrogen Absorption and Distribution[J].Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(2):233-239.

## Effects of different nitrogen on photosynthetic characteristics and nitrogen transport in winter wheat under drip irrigation

Zhang Daijing,Zong Jiejing, Ma Jianhui, Yang Xueqian, Yang Doudou, Hu Xiao

(Collage of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** The design of the split-block was carried out to study the effects of different nitrogen on photosynthetic characteristics, nitrogen accumulation and transport during the growth period of winter wheat under drip irrigation. Nitrogen fertilizer was the main area, with 3 levels ( $N_1$ : 100 kg · hm<sup>-2</sup>,  $N_2$ : 250 kg · hm<sup>-2</sup>,  $N_3$ : 350 kg · hm<sup>-2</sup>); drip irrigation was the sub-area, with 3 levels ( $W_0$ : drip irrigation bottom water,  $W_1$ : drip irrigation bottom water + jointing water,  $W_2$ : drip irrigation bottom water + jointing water + flowering water). The results showed that the maximum photochemical efficiency ( $Fv/Fm$ ) of wheat reached the highest at flowering stage, and it was higher with  $N_2$  treatment than those in  $N_1$  and  $N_3$  treatment. Under the same drip irrigation level, the chlorophyll content of wheat flag leaves showed that  $N_2$  and  $N$  were significantly higher than  $N_1$  during the whole growth period. Under  $N_2 W_2$  treatment, the nitrogen transport capacity of vegetative organs and the contribution rate to grain were the highest; the total nitrogen accumulation and nitrogen grain accumulation were the highest under  $N_2$  level. Under different drip irrigation treatments, total nitrogen accumulation and nitrogen grain accumulation were highest at  $W_2$  level. The highest yield is  $N_2 W_2$ , which is 6 684.71 kg · hm<sup>-2</sup>. According to the comprehensive grain yield, nitrogen accumulation, transport and photosynthetic characteristics, the nitrogen application rate was 250 kg · hm<sup>-2</sup>, and the drip irrigation amount was 214.52 mm, which was the optimal water-saving and nitrogen-saving model.

**Keywords:** winter wheat; drip irrigation; photosynthetic characteristics; nitrogen accumulation and transport

[责任编辑 王凤产 杨浦]