

## 施氮量对冬包蛋小麦干物质积累、产量及氮肥利用效率的影响

邢俊刚<sup>1</sup>, 谢小清<sup>2</sup>, 李胜楠<sup>3</sup>, 薛丽华<sup>2</sup>, 章建新<sup>1</sup>, 蒋鹏程<sup>1</sup>, 杨浩<sup>1</sup>, 刘斌<sup>1</sup>

(1. 新疆农业大学农学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院粮食作物研究所, 新疆乌鲁木齐 830091;

3. 额敏县气象局, 新疆额敏 834600)

**摘要:**为明确施氮对北疆冬包蛋小麦产量形成及氮素利用的调节作用,以冬小麦品种新冬18号为材料,采用随机区组试验设计,田间设置0 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>0</sub>),75 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>1</sub>),150 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>2</sub>),225 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>3</sub>)和300 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>4</sub>)5个施氮水平,分析了施氮量对冬包蛋小麦叶面积指数、干物质积累、植株氮素积累、氮肥吸收利用效率及产量的影响。结果表明,增施氮肥可增加小麦叶面积指数、总光合势、干物质积累量和干物质快速积累持续天数,其中N<sub>3</sub>和N<sub>4</sub>处理最大叶面积指数(4.57~4.76和4.58~4.79)、总光合势(181.50~206.43和185.09~208.13 m<sup>2</sup>·d·m<sup>-2</sup>)、最大干物质积累量(19 903.28~21 821.78和20 519.38~22 249.95 kg·hm<sup>-2</sup>)和干物质快速积累持续天数(26.2d~27.3和26.6~27.3 d)均显著高于其余处理,且N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub>处理间无显著差异。随着施氮水平的提高,花前氮素转运量和成熟期籽粒氮素积累量增加,且均表现为叶>茎鞘>穗;土壤氮贡献率、氮肥利用效率、氮肥吸收效率以及氮素收获指数均随施氮量增加呈下降趋势,氮肥利用率和氮肥农学效率呈先上升后下降的趋势,均以N<sub>3</sub>处理最大(60.52%~65.64%和6.35~12.48 kg·kg<sup>-1</sup>);N<sub>3</sub>处理籽粒产量最高,较N<sub>0</sub>处理增加21.27%~40.51%。在本试验条件下,北疆冬包蛋小麦高产的适宜施氮量为225 kg·hm<sup>-2</sup>(拔节期150 kg·hm<sup>-2</sup>+孕穗期75 kg·hm<sup>-2</sup>)。

**关键词:** 施氮量;冬小麦;极晚播;干物质积累;产量;氮素利用

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)03-0386-09

## Effects of Nitrogen Application on Dry Matter Accumulation, Yield and Nitrogen Use Efficiency of Extremely Late Sowing Winter Wheat

XING Jungang<sup>1</sup>, XIE Xiaoqing<sup>2</sup>, LI Shengnan<sup>3</sup>, XUE Lihua<sup>2</sup>, ZHANG Jianxin<sup>1</sup>,  
JIANG Pengcheng<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China;

2. Institute of Grain Crops, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China;

3. Emin County Meteorological Bureau, Emin, Xinjiang 834600, China)

**Abstract:** In order to determine the effect of nitrogen application rate on the yield formation of extremely late sowing winter wheat in northern Xinjiang, Xindong 18 was selected as the material and randomized block experimental design was adopted. Five nitrogen treatments of 0 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>0</sub>), 75 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>1</sub>), 150 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>2</sub>), 225 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>3</sub>) and 300 kg·hm<sup>-2</sup>(N<sub>4</sub>) were set up in the field. The leaf area index, dry matter accumulation, plant nitrogen accumulation, nitrogen fertilizer absorption and utilization efficiency and their relationship with yield were systematically studied. The results showed that: with the increase the amount of nitrogen application, the leaf area index, total photosynthetic potential, the accumulation of dry matter, and the number of days of rapid accumulation of dry matter increased, among which maximum leaf area index (4.57-4.76 and 4.58-4.79) and total

收稿日期:2024-02-24

修回日期:2024-05-29

基金项目:国家自然科学基金项目(32060433);新疆农业科学院自主培育专项项目(xjnykzpp-2022001)

第一作者 E-mail:1107843916@qq.com(邢俊刚)

通讯作者 E-mail:xuelihua521@126.com(薛丽华);zjxin401@126.com(章建新)

photosynthetic potential ( $181.50-206.43 \text{ m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-2}$  and  $185.09-208.13 \text{ m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{m}^{-2}$ ), maximum dry matter accumulation ( $19\ 903.28-21\ 821.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $20\ 519.38-22\ 249.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) and duration of rapid dry matter accumulation ( $26.2-27.3 \text{ d}$  and  $26.6-27.3 \text{ d}$ ) were significantly higher under  $N_3$  and  $N_4$  treatments than those under the remaining treatments. There was no significant difference between  $N_3$  and  $N_4$  treatments. With the increase of N application rate, nitrogen accumulation in grains at maturity was increased; nitrogen transfer before anthesis was increased, with all organs ranking as leaf > stem sheath > spike. Soil nitrogen contribution rate, nitrogen fertilizer utilization efficiency, nitrogen fertilizer absorption efficiency and nitrogen harvesting index all showed a downward trend with the increase of nitrogen application amount. The utilization efficiency of nitrogen fertilizer and nitrogen fertilizer agronomical efficiency has a tendency to rise first and then decline, among which  $N_3$  treatment was the largest ( $60.52\%-65.64\%$  and  $6.35-12.48 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The grain yield of  $N_3$  treatment was highest,  $21.27\%-40.51\%$  higher than that of  $N_0$  treatment. Under the conditions of this experiment, the optimum nitrogen application rate of winter wheat in extremely late sowing in northern Xinjiang was  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  at jointing stage +  $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  at booting stage).

**Keywords:** Nitrogen application rate; Winter wheat; Extremely late sowing; Dry matter; Yield; Nitrogen utilization

小麦是新疆重要的粮食作物,对保障中国国家粮食安全发挥着重要作用。新疆小麦常年种植面积在  $1.20 \times 10^6 \text{ hm}^2$  左右。北疆冬小麦适宜播期为 9 月 15 日—9 月 25 日<sup>[1]</sup>。近年,因晚熟作物(玉米、棉花)或复种作物收获后已至 10 月中下旬,冬小麦晚播种植现象比较普遍。冬小麦晚播条件下由于冬前积温不足,生育期大幅缩短,导致小麦冬前生长发育不充分,不能形成壮苗,极易造成减产<sup>[2]</sup>。施氮是小麦生产中最重要栽培措施之一,氮肥运筹方式对实现小麦高产高效至关重要。合理的施用氮肥可以延长叶片功能期,促进干物质积累,促进营养器官中干物质向籽粒转运,增加小麦产量<sup>[3-6]</sup>。研究表明,在晚播条件下,适时适量增施氮肥有利于小麦植株的干物质积累和氮素积累<sup>[7-8]</sup>,且有利于维持小麦的产量稳定<sup>[9]</sup>,同时具有较高的氮肥利用效率与经济效益<sup>[10]</sup>。冬包蛋小麦是极晚播的冬小麦,无冬前生长,其生长发育规律有别于一般的晚播冬小麦。冬包蛋小

麦较晚播冬小麦具有节水、无冬前管理等优点<sup>[11]</sup>。有关施氮量对冬包蛋小麦产量形成机制的影响研究鲜见报道。本试验通过分析施氮量对冬包蛋小麦叶面积指数、干物质积累、植株氮素积累、氮肥利用率及产量的影响,明确北疆冬包蛋小麦适宜的施氮量,以期为北疆冬包蛋小麦高产栽培技术提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2021—2023 年在新疆农业科学院小麦育种家额敏基地 ( $46^{\circ}34' \text{ N}$ ,  $83^{\circ}42' \text{ E}$ ) 进行。该地属大陆性温带气候,全年日照时数 2 809 h,无霜期 195 d,年均降水量 150 mm,年均气温  $5.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高气温  $39 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低气温  $-34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验地为壤土,前茬作物为玉米。2021—2023 年小麦播种前 0~20 cm 土层养分含量见表 1,试验期间小麦整个生长季降水量和平均气温见表 2。

表 1 0~20 cm 土层基础养分含量

Table 1 Basic nutrient content in 0—20 cm soil layer

年份 Year	有机质 Organic/%	碱解氮 Effective nitrogen/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效钾 Available potassium/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效磷 Available phosphorus/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	pH 值 pH value
2021—2022	1.50	62.5	72.0	47.5	8.4
2022—2023	1.20	65.5	63.3	50.0	8.2

表 2 小麦生长季降水量和平均气温

Table 2 Precipitation and average temperature during the wheat growing season

年份 Year	指标 Index	月份 Month									总和 Total
		11	12	1	2	3	4	5	6	7	
2021—2022	降水量 Precipitation/mm	41.2	23.3	2.0	8.6	48.6	32.5	13.7	12.2	24.0	206.1
	气温 Temperature/°C	-2.4	-5.0	-6.8	-6.9	2.4	13.4	32.5	23.9	24.1	
2022—2023	降水量 Precipitation/mm	58.0	9.7	23.6	11.2	46.6	29.9	5.8	3.8	5.7	194.3
	气温 Temperature/°C	-1.5	-12.2	-12.6	-5.8	4.2	9.6	15.6	24.0	25.6	

### 1.2 试验设计

供试冬小麦品种为新冬 18 号。共设 5 个施氮水平,分别为  $N_0$  ( $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、 $N_1$  (拔节期  $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、 $N_2$  (拔节期  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、 $N_3$  (拔节期  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  + 孕穗期  $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、 $N_4$  (拔节期  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  + 孕穗期  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。试验采用随机区组设计,小区面积为  $21 \text{ m}^2$  ( $7 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ),重复 3 次。10 月下旬翻地前施重过磷酸钙  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,翻地后旋耕、耙地。小麦 2021 年和 2022 年播种时间分别为 10 月 31 日和 11 月 2 日,行距  $20 \text{ cm}$ ,播种量为  $1\,000 \text{ 万粒} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。所用氮肥为尿素,滴灌过程中随水滴施。并于拔节期、孕穗期各处理随水滴施  $\text{K}_2\text{O}$   $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。毛管配置为 1 管 4 行,毛管间距  $60 \text{ cm}$ 。处理间设置  $1.5 \text{ m}$  宽隔离带,防止小区间渗水渗肥。冬前不灌水,第二年春分别在拔节期、孕穗期、开花期、花后 10 d 及花后 20 d 各滴灌 1 次,共计 5 次,每次滴灌量  $750 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,其他管理同一般大田管理。小麦 2022 年和 2023 年的收获时间分别为 7 月 8—13 日和 7 月 8—16 日。

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 干物质积累、叶面积指数和光合势的测定

于小麦拔节期、孕穗期、开花期、花后 10 d、花后 20 d 及成熟期,每小区去边行选取具有代表性的样段  $0.5 \text{ m}$ ,重复 3 次。将取回的植株洗净泥土剪去根系后按叶、茎+鞘、穗分别装入纸袋中,放入烘箱中,先  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  杀青 30 min,然后调至  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干至恒重,称量各部分干物质质量。按不同叶位,采用比叶重法测定绿叶面积,计算叶面积指数。按照光合势 =  $(L_1 + L_2) / 2 \times (t_2 - t_1)$  计算光合势,其中  $L_1$  和  $L_2$  分别为前后 2 次测定的叶面积指数, $t_1$  和  $t_2$  分别为前后 2 次的取样时间。

#### 1.3.2 植株氮积累量及相关指标测定

将留存的粉碎样品用  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  进行消煮,采用奈氏比色法进行氮素测定。按照以下公式计算氮素积累量、转运参数及利用效率<sup>[12]</sup>:

$$\text{氮素积累量} = \text{氮素含量} \times \text{干物质质量}$$

$$\text{土壤氮素贡献率} = (\text{不施氮区地上部植株氮积累量} / \text{施氮区地上部植株氮积累量}) \times 100\%$$

$$\text{氮素收获指数} = \text{籽粒中氮积累量} / \text{成熟期总氮积累量} \times 100\%$$

$$\text{氮肥利用率} = (\text{施氮区地上部氮素积累量} - \text{不施氮区地上部氮素积累量}) / \text{施氮量} \times 100\%$$

$$\text{氮素利用效率} = \text{籽粒产量} / \text{植株氮素积累量}$$

$$\text{氮素吸收效率} = \text{植株氮素积累量} / \text{施氮量}$$

$$\text{氮肥农学利用率} = (\text{施氮区籽粒产量} - \text{不施氮区籽粒产量}) / \text{施氮量}$$

$$\text{氮肥偏生产力} = \text{施氮区籽粒产量} / \text{施氮量}$$

$$\text{营养器官氮素转运量} = \text{开花期营养器官氮素积累量} - \text{成熟期营养器官氮素积累量}$$

$$\text{营养器官氮素贡献率} = \text{营养器官氮素转运量} \div \text{成熟期籽粒氮素积累量} \times 100\%$$

#### 1.3.3 产量及其构成因素测定

于成熟期在各小区选取有代表性的  $2 \text{ m}$  长样段,进行产量构成因素调查,3 次重复。各小区去除边行,单独收获  $4 \text{ m}^2$  (长  $2 \text{ m} \times$  宽  $2 \text{ m}$ ) 区域,脱粒称重,籽粒产量按 13% 含水量计算,均 3 次重复。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2021 进行数据处理与作图,采用 SPSS 19.0 及 DPS9.5 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量对冬包蛋小麦叶面积指数及光合势的影响

两年中小麦叶面积指数在拔节期不同处理间

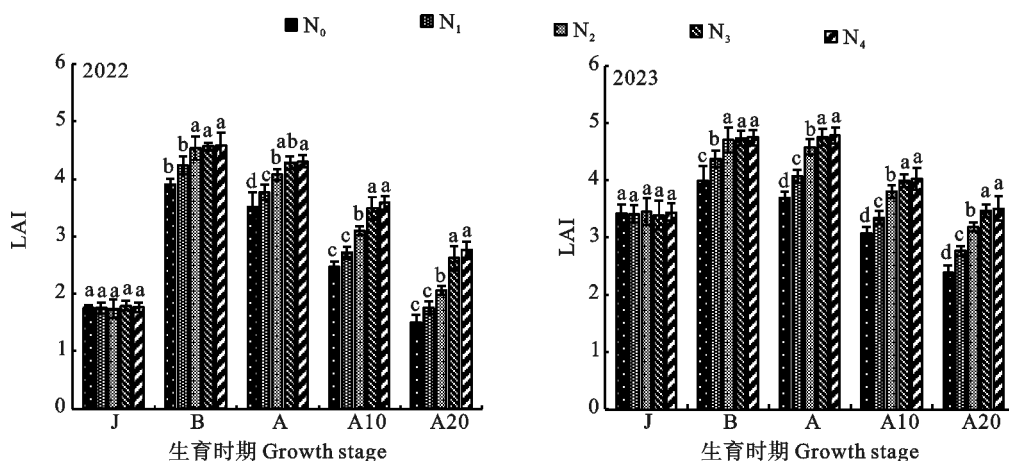
差异不显著,从孕穗期至花后 20 d 均表现为  $N_4$  ( $N_3$ ) >  $N_2$  >  $N_1$  >  $N_0$ , 且  $N_4$  和  $N_3$  处理间差异不显著,但与其他处理差异显著(图 1)。2022 年和 2023 年最大叶面积指数分别出现在孕穗期和开花期,且 2023 年孕穗期的  $N_3$ 、 $N_4$  处理分别较  $N_0$  处理增加 14.6% 和 14.9%,2023 年开花期的  $N_3$ 、 $N_4$  处理最大叶面积指数分别较  $N_0$  处理增加 15.8% 和 16.1%。两年各时期的光合势及总光合势对施氮量的响应规律与叶面积表现基本一致(图 2)。其中,群体总光合势也表现为  $N_4$  ( $N_3$ ) >  $N_2$  >  $N_1$  >  $N_0$ ,  $N_3$ 、 $N_4$  处理的总光合势较  $N_0$  处理在 2022 年分别增加 29.9% 和 32.5%,在 2023 年分别增加 21.5% 和 22.5%。由此可见适当提高

施氮水平有助于冬包蛋小麦增大光合面积和光合势,但施氮量过大,施氮的效应变得不明显。

### 2.2 施氮量对冬包蛋小麦干物质积累的影响

两年中小麦干物质积累量随生育进程的推进而增加,在成熟期达到最大值;在拔节期不同处理间差异不显著,从孕穗期至成熟期均表现为  $N_4$  ( $N_3$ ) >  $N_2$  >  $N_1$  >  $N_0$ , 且  $N_4$  和  $N_3$  处理间差异不显著,但与其他处理差异显著(图 3)。成熟期  $N_4$ 、 $N_3$  处理的干物质积累量较  $N_0$  处理在 2022 年分别增加 49.2% 和 53.8%,在 2023 年分别增加 38.2% 和 40.9%。这说明适量增加施氮量可促进冬包蛋小麦干物质积累。

经 Logistic 方程对小麦干物质积累进行拟合,

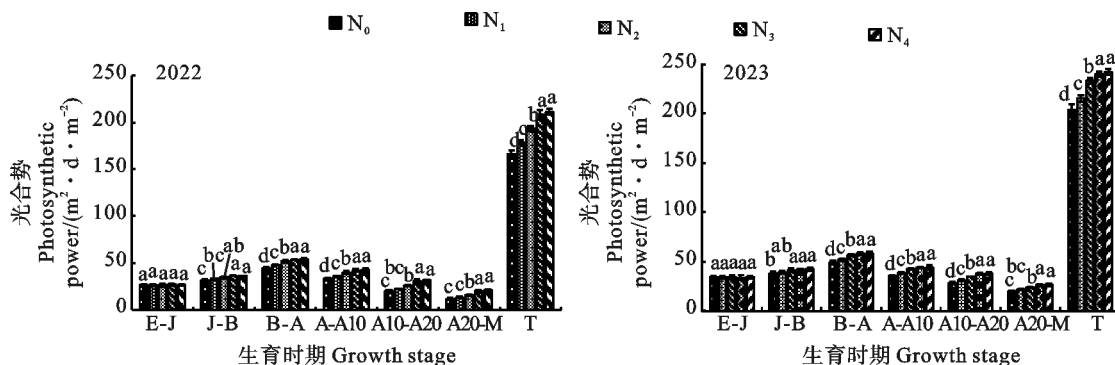


J: 拔节期; B: 孕穗期; A: 开花期; A10: 花后 10 d; A20: 花后 20 d。同一时期图柱上不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下同。

J: Jointing stage; B: Booting stage; A: Anthesis stage; A10: 10 d after anthesis; A20: 20 d after anthesis. Different letters above the columns indicate significant differences among different treatments at the same stage at 0.05 level. The same in figures 2-6.

图 1 施氮量对冬包蛋小麦的叶面积指数(LAI)的影响

Fig. 1 Effects of different nitrogen application levels on the leaf area index(LAI) of the extremely late sowing winter wheat



J-B: 拔节至孕穗; B-A: 孕穗-至开花; A-A10: 开花至花后 10 d; A10-A20: 花后 10 d 至花后 20 d; A20-M: 花后 20 d 至成熟; T: 总合。  
J-B: Jointing to booting; B-A: Booting to flowering; A-A10: Anthesis to 10 d after anthesis; A10-A20: 10 d after anthesis to 20 d after anthesis; A20-M: 20 d after anthesis to maturity; T: Total.

图 2 施氮量对冬包蛋小麦的光合势的影响

Fig. 2 Effects of different nitrogen application levels on the photosynthetic potential of the extremely late sowing winter wheat

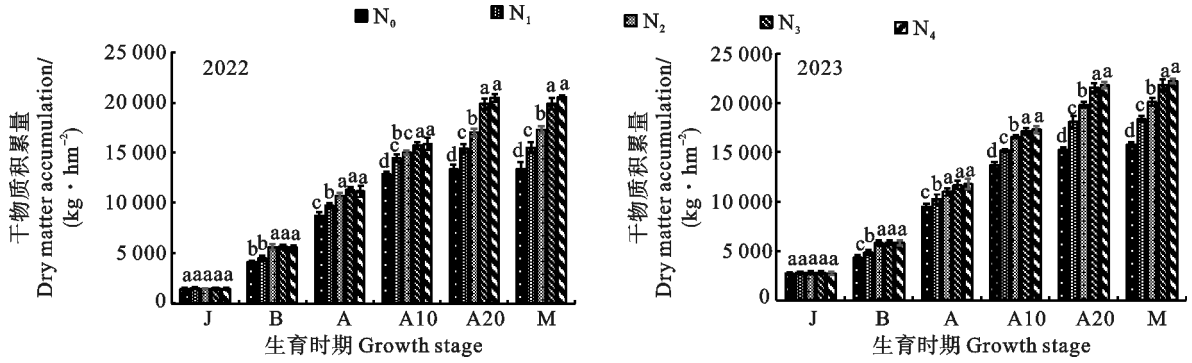


图 3 施氮量对冬包蛋小麦的干物质积累量的影响

Fig. 3 Effects of different nitrogen application levels on the accumulation of dry matter in the extremely late sowing winter wheat

表 3 不同施氮量下冬包蛋小麦的干物质积累速率 Logistic 方程

Table 3 Logistic equation of dry matter accumulation rate of the extremely late sowing winter wheat under different nitrogen application levels

年份 Year	处理 Treatment	方程 Equation	$V_m /$ ( $kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}$ )	$R^2$	持续时间 Duration/d			
					$t_1$	$t_2$	$t_m$	$\Delta t$
2022	N <sub>0</sub>	$y = 13825.7 / [1 + e^{(7.380 - 0.125 1t)}]$	432.2	0.996 4 * *	48.5	69.5	59.0	21.1
	N <sub>1</sub>	$y = 16049.5 / [1 + e^{(7.417 - 0.123 8t)}]$	496.7	0.997 9 * *	49.3	70.6	59.9	21.3
	N <sub>2</sub>	$y = 17798.2 / [1 + e^{(6.624 - 0.110 5t)}]$	491.9	0.997 9 * *	48.0	71.8	59.9	23.8
	N <sub>3</sub>	$y = 21081.7 / [1 + e^{(6.322 - 0.100 4t)}]$	529.3	0.991 9 * *	49.8	76.1	63.0	26.2
	N <sub>4</sub>	$y = 21928.3 / [1 + e^{(6.321 - 0.098 9t)}]$	542.1	0.991 2 * *	50.6	77.	63.9	26.6
2023	N <sub>0</sub>	$y = 16337.5 / [1 + e^{(5.805 - 0.102 6t)}]$	419.1	0.992 9 * *	43.7	69.4	56.6	25.7
	N <sub>1</sub>	$y = 19274.5 / [1 + e^{(5.801 - 0.099 7t)}]$	480.4	0.994 6 * *	45.0	71.4	58.2	26.4
	N <sub>2</sub>	$y = 21173.7 / [1 + e^{(5.670 - 0.097 4t)}]$	515.6	0.995 1 * *	44.7	71.7	58.2	27.0
	N <sub>3</sub>	$y = 23073.5 / [1 + e^{(5.725 - 0.096 6t)}]$	556.9	0.994 7 * *	45.7	72.9	59.3	27.3
	N <sub>4</sub>	$y = 23482.8 / [1 + e^{(5.754 - 0.096 6t)}]$	567.0	0.995 4 * *	45.9	73.2	59.6	27.3

$t$ : 出苗后的天数;  $y$ : 为干物质积累量;  $V_m$ : 为干物质最大增长速率;  $t_m$ : 最大速率出现的时间;  $t_1$  和  $t_2$ : 生长函数的两个拐点;  $\Delta t$ : 干物质快速积累持续天数; \* \* :  $P < 0.01$ 。

$t$ : The number of days after the seedling;  $y$ : The amount of dry matter accumulation;  $V_m$ : The maximum growth rate of dry matter;  $t_m$ : The time of the maximum rate;  $t_1$  and  $t_2$ : The two inflection points of the growth function;  $\Delta t$ : The number of days of rapid accumulation of dry matter; \* \* :  $P < 0.01$ .

各处理的  $R^2$  均大于 0.97, 均达到极显著水平。依据方程对干物质积累参数进行分析, 两年中的干物质积累最大增长速率( $V_m$ )和干物质快速积累持续天数( $\Delta t$ )均以  $N_3$ 、 $N_4$  处理较高。其中,  $N_3$ 、 $N_4$  处理的  $V_m$  较  $N_0$  处理在 2022 年分别增加 22.5% 和 25.4%, 在 2023 年分别增加 32.9% 和 35.3%;  $\Delta t$  在 2022 年分别延长 5.1 和 5.5 d, 在 2022 年均延长 1.6 d。这说明干物质快速积累持续天数和干物质积累的最大增长速率的增加是增施氮肥促进小麦干物质积累的重要原因。

### 2.3 施氮量对冬包蛋小麦各器官氮积累与转运的影响

由表 4 可知, 除拔节期外, 冬包蛋小麦各营养器官的氮素积累量在其他生育时期均随施氮量的

增加而增加。各营养器官氮素积累量开花期  $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$ 、 $N_4$  处理间差异显著, 而  $N_3$ 、 $N_4$  处理间差异大多不显著。与  $N_0$  处理相比, 2022 年,  $N_3$ 、 $N_4$  处理的茎鞘、叶、穗的氮素积累量开花期分别增加 153.7% 和 166.3%、169.5% 和 183.0%、76.1% 和 84.9%, 成熟期分别增加 148.3% 和 201.1%、276.6% 和 304.3%、192.9% 和 246.4%、74.3% 和 79.5%; 2023 年, 开花期  $N_3$ 、 $N_4$  处理的茎鞘、叶、穗的氮素积累量分别增加 189.9% 和 197.6%、189.8% 和 192.6%、99.1% 和 119.3%, 成熟期分别增加 195.0% 和 205.0%、419.4% 和 433.3%、192.3% 和 192.3%、96.2% 和 105.7%。增加施氮量后两年的成熟期籽粒氮素积累量也均增加,  $N_3$ 、 $N_4$  处理均高于其他处理。

表 4 施氮量对冬包蛋小麦植株氮素积累及氮素转运的影响  
Table 4 Effects of different nitrogen application levels on the nitrogen accumulation and the nitrogen transport in the extremely late sowing winter wheat plants

年份 Year	处理 Treatment	拔节期 Jointing stage			孕穗期 Booting stage			开花期 Anthesis stage			成熟期 Maturity stage			花前氮素转运量 Nitrogen transfer			花前氮素转运的贡献率 Contribution rate of transported nitrogen/%		
		茎鞘 Stem sheath	叶 leaf	穗 Spike	茎鞘 Stem sheath	叶 leaf	穗 Spike	茎鞘 Stem sheath	叶 leaf	穗 Spike	茎鞘 Stem sheath	叶 leaf	穗 Spike	茎鞘 Stem sheath	叶 leaf	穗 Spike	茎鞘 Stem sheath	叶 leaf	穗 Spike
2022	N <sub>0</sub>	11.3a	15.6a	31.1c	30.0d	30.5d	23.8c	8.7c	4.7c	5.6c	112.1d	21.4c	25.8b	18.3b	19.1c	23.0b	16.3a		
	N <sub>1</sub>	10.4a	15.6a	42.1b	40.4c	41.8c	26.1c	11.8b	7.7bc	7.5c	129.2c	31.9bc	32.7bc	18.6b	24.7b	25.3b	14.4a		
	N <sub>2</sub>	12.8a	15.3a	53.8a	52.4b	53.2b	35.8b	11.8b	10.0b	13.4b	163.0b	40.6b	43.2b	22.4a	24.9b	26.5b	13.7a		
	N <sub>3</sub>	12.5a	14.6a	48.3a	45.7a	48.2a	41.9a	21.6a	17.7a	16.4ab	195.4a	54.5a	64.5a	25.5a	27.9a	33.0a	13.0a		
	N <sub>4</sub>	13.6a	14.8a	46.8a	46.8a	53.2a	44.0a	26.2a	19.0a	19.4a	201.2a	53.8a	67.3a	24.6a	26.7a	33.4a	12.2a		
2023	N <sub>0</sub>	7.1a	14.4a	22.0c	24.8d	28.4d	21.2d	4.0c	3.6c	5.2c	102.1c	20.9c	24.7d	16.0c	20.4c	24.2c	15.7a		
	N <sub>1</sub>	6.9a	13.3a	31.4b	36.3c	37.4c	26.4c	7.1b	5.3bc	9.1b	119.5c	29.2bc	32.1c	17.4c	24.4bc	26.9bc	14.5a		
	N <sub>2</sub>	7.5a	13.1a	43.3a	50.0b	50.1b	32.8b	11.5a	7.1b	11.3b	149.8b	38.5b	43.0b	21.6b	25.7b	28.7b	14.4a		
	N <sub>3</sub>	6.1a	15.7a	41.3a	71.9a	82.3a	42.2a	11.8a	18.7a	15.2a	200.3a	60.1a	63.7a	27.0ab	30.0a	31.8a	13.5a		
	N <sub>4</sub>	9.0a	13.4a	42.1a	73.8a	83.1a	46.5a	12.2a	19.2a	15.2a	210.0a	61.6a	63.9a	31.4a	29.3a	30.4a	14.9a		

穗指麦穗除籽粒以外的所有部分。同一年同列数据后不同字母表示不同处理间差异在 0.05 水平上显著。下表同。

Ear refers to all parts except for the kernel in spike. Different letters after the values within the same columns indicate significant differences among different treatments in a same year at 0.05 level. The same in table 5 and table 6.

表 5 施氮量对冬包蛋小麦氮吸收利用的影响

Table 5 Effects of different nitrogen application levels on the absorption and utilization of nitrogen in the extremely late sowing winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	土壤氮素贡献率 Soil N contribution/%	氮肥利用率 N use efficiency/%	氮素吸收效率 N uptake efficiency/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	氮素收获指数 N harvest index/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	氮肥农学效率 Nitrogen agronomic efficiency/(kg·kg <sup>-1</sup> )	氮肥偏生产力 Nitrogen fertility/ (kg·kg <sup>-1</sup> )
2022	N <sub>0</sub>	—	—	51.3a	0.86a	—	—
	N <sub>1</sub>	83.4a	33.7c	45.2ab	2.1a	5.2b	94.8a
	N <sub>2</sub>	66.3b	44.9b	38.4b	1.3b	5.8b	50.6b
	N <sub>3</sub>	52.9c	53.4a	32.9c	1.1c	6.4a	36.2c
	N <sub>4</sub>	49.4c	44.9b	30.5c	0.9d	4.6c	27.0d
2023	N <sub>0</sub>	—	—	60.4a	0.89a	—	—
	N <sub>1</sub>	84.0a	34.9c	45.6ab	2.1a	11.5d	103.9a
	N <sub>2</sub>	65.4ab	43.4b	49.4b	1.2b	11.6b	57.9b
	N <sub>3</sub>	48.1b	58.3a	40.8c	1.1bc	12.5a	43.3c
	N <sub>4</sub>	44.9b	47.3b	36.4c	0.9c	8.0c	31.1d

花前各营养器官氮素转运量均随施氮的增加而增加,  $N_4$ 、 $N_3$  处理花前氮素各器官转运量较高, 但  $N_3$ 、 $N_4$  处理间差异不显著。茎鞘和叶花前贮存氮素转运量对籽粒氮素的贡献率随施氮量的增加而增加,  $N_3$ 、 $N_4$  处理最高, 2022 年分别为 27.9% 和 26.7%、33.0% 和 33.4%, 2023 年分别为 30.0% 和 29.3%、31.8% 和 30.4%; 穗对籽粒的贡献率在不同施氮处理间差异不显著。两年中各营养器官花前氮素转运量及对籽粒氮素的贡献率均表现为叶 > 茎鞘 > 穗。

#### 2.4 施氮量对冬包蛋小麦氮吸收利用的影响

随施氮量的增加, 氮肥偏生产力、土壤氮素贡献率、氮素利用效率、氮素吸收效率以及氮素收获指数两年均呈降低趋势; 而氮肥利用效率和氮肥

农学效率呈先增后降趋势(表 5), 两年均以  $N_3$  处理最高, 2022 年氮肥利用效率和氮肥农学效率分别为 53.4% 和  $6.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 2023 年分别为 58.3% 和  $12.5 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

#### 2.5 施氮量对冬包蛋小麦产量及其构成因素的影响

由表 6 可知, 随施氮量的增加, 穗数呈增加趋势; 产量、穗粒数和千粒重均呈先增加后下降的趋势, 两年均为  $N_3$  处理最高, 但  $N_3$  和  $N_4$  处理间三个指标均差异不显著。其中,  $N_3$  处理的产量在 2022 年和 2023 年较  $N_0$  处理分别增加 17.5% 和 28.8%。由此可见, 增施氮肥可通过产量构成因素的协同提升来增加籽粒产量, 但过量施氮后效果不明显。

表 6 施氮量对冬包蛋小麦产量及其构成因素的影响

Table 6 Effects of different nitrogen application levels on yield and its component factors of the extremely late sowing winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spike/( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	穗粒数 Grain per spike	千粒重 1 000 grain weight/g	产量 Yield/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
2022	$N_0$	473.3c	39.0d	40.6b	6 722.7d
	$N_1$	513.3b	41.3c	41.2b	7 109.6c
	$N_2$	543.3ab	42.1b	42.5ab	7 591.8b
	$N_3$	568.9ab	44.0a	42.9a	8 152.5a
	$N_4$	576.7a	43.2ab	42.6ab	8 087.0ab
2023	$N_0$	640.0c	29.4c	44.9b	6 932.0d
	$N_1$	717.7b	29.9c	45.1b	7 792.7c
	$N_2$	745.0a	31.8b	45.6ab	8 677.7b
	$N_3$	753.3a	36.3a	46.5a	9 740.2a
	$N_4$	755.0a	34.5ab	46.5ab	9 319.2ab

### 3 讨论

叶面积指数和光合势是反映植物群体生长状况的一个重要指标, 其大小直接与最终产量密切相关, 可采用适宜的施肥制度来调节群体结构<sup>[13]</sup>。研究发现, 施用氮肥在提高小麦叶面积的同时, 还可延长光合时间、增加光合势, 进而增强光合能力, 实现小麦增产<sup>[3, 14-15]</sup>, 但过高的施氮量会导致群体质量下降, 不利于产量的提升<sup>[16]</sup>。本研究表明, 增施氮肥有利于冬包蛋小麦群体叶面积指数和总光合势的提高, 当施氮量超过  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 对叶面积指数和总光合势的提高效果不显著。晚播条件下, 小麦群体干物质质量会有所下降, 增施氮肥可提高群体干物质积累量, 但过多施氮会抑制小麦生长, 不利于小麦干物质的积

累<sup>[4, 17]</sup>。有研究指出, 在  $0 \sim 210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  施氮量条件下, 干物质积累量随施氮量的增加而增加, 但超出此范围后干物质积累量有所下降<sup>[18]</sup>。本研究中, 增施氮肥对提高冬包蛋小麦干物质积累有利, 但当施氮量超过  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 对干物质积累不显著。适量增施氮肥可提高营养器官和籽粒的氮素积累<sup>[19]</sup>。江东国等<sup>[2]</sup>认为, 稻茬晚播小麦植株含氮量随施氮量的增加呈上升趋势。本研究也表明, 增施氮肥能显著提高冬包蛋小麦各器官氮素积累量。熊淑萍等<sup>[20]</sup>研究提出, 小麦氮素积累与分配在开花期前表现为叶片大于茎鞘, 在成熟期, 茎鞘与叶片的氮含量显著下降, 与本研究结果一致。小麦籽粒中的氮素约 80% 来自花前各营养器官的花后转运<sup>[21]</sup>。晚播小麦花前营养器官的贮存氮素转运量、转运氮素对籽粒氮素

的贡献率均随施氮量的增加而增加<sup>[2]</sup>。滴灌条件下,冬小麦花前干物质转运对籽粒产量的贡献率随施氮量的增加呈先增后降的趋势,当施氮量为 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时最大<sup>[22]</sup>。本研究中,冬包蛋小麦花前氮素转运量随施氮量的增加而增加,而花前氮素转运量对籽粒氮素贡献率随施氮量的增加呈先升后降的趋向,当施氮量为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时最大。随施氮量的增加,土壤氮素贡献率降低,表明随施氮量增加,小麦吸收的氮素中来自肥料的氮素比例提高。氮素利用效率、氮素吸收效率、氮素收获指数均随施氮量的增加呈下降趋势<sup>[23-24]</sup>。本研究与前人结果一致。这说明随着施氮量的增加,冬包蛋小麦吸收氮素营养并转移到籽粒中的能力逐步减小,产量对氮肥的响应下降。作物高产是由有效穗数、穗粒数和千粒重协同发展的结果<sup>[25]</sup>。氮素是小麦生长发育和器官建成的重要生物因子,适量施氮可显著提高小麦籽粒产量<sup>[26]</sup>。在李廷亮等<sup>[27]</sup>的研究中,施氮量在 $0\sim 180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围内,穗数、穗粒数和千粒重均随施氮量的增加而增加,但当施氮量超过 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,产量构成要素基本没变化。本研究结果表明,冬包蛋小麦在 $\text{N}_3$ ( $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )处理下虽然穗数略低于 $\text{N}_4$ ( $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )处理,但其穗粒数及千粒重均高于 $\text{N}_4$ 处理,产量与 $\text{N}_4$ 处理差异不显著。这说明冬包蛋小麦产量在 $0\sim 225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 内随施氮量增加而增加,当施氮量超过 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时增产效果不显著。

#### 4 结论

新疆种植冬包蛋小麦,适当增施氮肥有利于增加群体叶面积指数、总光合势、干物质积累量植株氮素积累量,最终提高产量和氮肥利用效率;在本试验条件下,新疆冬包蛋小麦适宜的施氮量为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (拔节期 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +孕穗期 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。

#### 参考文献:

- [1] 苏文平,王欢,艾木拉姑丽·库尔班,等. 新疆临冬播小麦品种间生育特性及产量比较[J]. 作物杂志,2021(6):108.  
SU W P, WANG H, AIMULAGULI · KUERBAN, *et al.* Comparison of growth characteristics and yields of different wheat varieties planted in the approaching winter in northern Xinjiang [J]. *Crops*, 2021(6):108.
- [2] 江东国,黄正来,张文静,等. 晚播条件下施氮量对稻茬小麦氮素吸收及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2019,39(10):1219.  
JIANG D G, HUANG Z L, ZHANG W J, *et al.* Effects of nitrogen application on nitrogen uptake and yield of wheat under late sowing conditions after rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(10):1219.
- [3] 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):15.  
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):15.
- [4] KOUTROUBAS S D, FOTIADIS S, DAMALAS C A. Biomass and nitrogen accumulation and translocation in spelt (*Triticum spelta*) grown in a Mediterranean Area [J]. *Field Crops Research*, 2012, 127:6.
- [5] KONG L, XIE Y, HU L, *et al.* Remobilization of vegetative nitrogen to developing grain in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Field Crops Research*, 2016, 196:142.
- [6] 张杰,王备战,冯晓,等. 氮肥调控对冬小麦干物质质量、产量和氮素利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(4):519.  
ZHANG J, WANG BZ, FENG X, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer management on the dry matter quantity, yield and N utilization in winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(4):519.
- [7] 赵广才,张艳,刘利华,等. 施肥和密度对小麦产量及加工品质的影响[J]. 麦类作物学报,2005,25(5):57.  
ZHAO G C, ZHANG Y, LIU L H, *et al.* Effect of different fertilizing and plant density on grain yield and its processing quality of wheat [J]. *Acta Triticeae Crops*, 2005, 25(5):57.
- [8] 王竞绍,董召荣,张健,等. 密度、氮肥基追比例对不同穗型小麦产量的影响[J]. 安徽农业大学学报,2011,38(1):18.  
WANG J S, DONG Z R, ZHANG J, *et al.* Effects of different densities and ratios of base and top-dressing nitrogen fertilizer on grain yield of two wheat varieties with different spike types [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2011, 38(1):18.
- [9] 张明伟,丁锦峰,朱新开,等. 稻茬过晚播小麦高产密度和氮肥调控效应分析[J]. 作物杂志,2023(4):134.  
ZHANG M W, DING J F, ZHU X K, *et al.* Analysis of high-yielding planting density and nitrogen application in super-late sowing wheat following rice [J]. *Crops*, 2023(4):134.
- [10] 李欣欣,石祖梁,王久臣,等. 施氮量和种植密度对稻茬晚播小麦干物质积累及光合特性的影响[J]. 华北农学报,2020,35(5):147.  
LI X X, SHI Z L, WANG J C, *et al.* Effects of nitrogen application amount and planting density on dry matter accumulation and flag leaf photosynthetic characteristics for late-sowing wheat in rice-wheat rotation [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(5):147.
- [11] 赵鑫琳,邢俊刚,薛丽华,等. 播种模式对新疆小麦干物质积累和产量及水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2024,44(5):639.  
ZHAO X L, XING J G, XUE L H, *et al.* Effects of sowing patterns on dry matter accumulation, yield, and water use ef-

- iciency of wheat in Xinjiang [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(5): 639.
- [12] 韩占江, 于振文, 王东, 等. 测墒补灌对冬小麦氮素积累与转运及籽粒产量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1634.  
HAN Z J, YU Z W, WANG D, *et al.* Effects of supplemental irrigation based on measured soil moisture on nitrogen accumulation, distribution and grain yield in winter wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1634.
- [13] 杜进勇, 柴强, 王一帆, 等. 地上地下互作强度对小麦间作玉米光合特性的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(9): 1404.  
DU J Y, CHAI Q, WANG Y F, *et al.* Effect of above-and below-ground interaction intensity on photosynthetic characteristics of wheat-maize intercropping [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(9): 1404.
- [14] 张金油, 贾永红, 孙鹏, 等. 匀播和施氮量对冬小麦群体、光合及干物质积累的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 14.  
ZHANG J S, JIA Y H, SUN P, *et al.* Effect of uniform pattern and N application rate on colony, photosynthesis and dry matter accumulation of winter wheat [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 14.
- [15] 石鑫蕊, 任彬彬, 江琳琳, 等. 有机肥替代部分化肥对水稻光合速率、氮素利用率和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 158.  
SHI X R, REN B B, JIANG L L, *et al.* Effects of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on the photosynthetic rate, nitrogen use efficiency and yield of rice [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 158.
- [16] 束林华, 朱新开, 陶红娟, 等. 施氮量对弱筋小麦扬辐麦2号产量和品质调节效应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2007, 28(2): 37.  
SHU L H, ZHU X K, TAO H J, *et al.* Effects of nitrogen application amount on grain yield and quality in weak-gluten wheat Yangfumai 2 [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2007, 28(2): 37.
- [17] 张敏, 王岩岩, 蔡瑞国, 等. 播期推迟对冬小麦产量形成和籽粒品质的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(2): 327.  
ZHANG M, WANG Y Y, CAI R G, *et al.* Regulating effect of delayed sowing date on yield formation and grain quality of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(2): 327.
- [18] 宋明丹, 李正鹏, 冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 123.  
SONG M D, LI Z P, FENG H. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 123.
- [19] 蒿宝珍, 姜丽娜, 方保停, 等. 限水灌溉冬小麦冠层氮分布与转运特征及其对供氮的响应[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4949.  
HAO B Z, JIANG L N, FANG B T, *et al.* Effect of different nitrogen supply on the temporal and spatial distribution and remobilization of canopy nitrogen in winter wheat under limited irrigation condition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 4949.
- [20] 熊淑萍, 吴延鹏, 王小纯, 等. 减氮处理对不同小麦品种干物质积累及氮素转运特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(8): 1136.  
XIONG S P, WU Y P, WANG X C, *et al.* Effect of lower nitrogen application on dry matter accumulation and nitrogen translocation of different wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(8): 1136.
- [21] 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 and Crop Science*, 2005, 191(6): 439.
- [22] 雷钧杰, 张永强, 赛力汗·赛, 等. 施氮量对滴灌冬小麦干物质积累、分配与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(8): 1078.  
LEI J J, ZHANG Y Q, SAILIHAN · SAI, *et al.* Effect of nitrogen application rate on dry matter accumulation, distribution and translocation of winter wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(8): 1078.
- [23] 吴培金, 闫素辉, 张从宇, 等. 应用<sup>15</sup>N分析施氮量对弱筋小麦氮素吸收利用与产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(4): 124.  
WU P J, YAN S H, ZHANG C Y, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen uptake, utilization and yield of weak gluten wheat using <sup>15</sup>N trace technique [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(4): 124.
- [24] XU Z, YU Z, ZHAO J. Theory and application for the promotion of wheat production in China: Past, present and future [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(10): 2348.
- [25] 王磊, 董树亭, 刘鹏, 等. 水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 307.  
WANG L, DONG S T, LIU P, *et al.* Effects of water and nitrogen interaction on physiological and photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 307.
- [26] 闫翠萍, 裴雪霞, 王姣爱, 等. 秸秆还田与施氮对冬小麦生长发育及水肥利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 275.  
YAN C P, PEI X X, WANG J A, *et al.* Effect of corn straw returned to soil and N application on growth, water and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 275.
- [27] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 等. 施氮量对晋南旱地冬小麦光合特性、产量及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(4): 710.  
LI T L, XIE Y H, HONG J P, *et al.* Effects of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics, yield, and nitrogen utilization in rainfed winter wheat in southern Shanxi [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(4): 710.