

# 绿洲生态条件下氮磷肥配施对冬小麦干物质分配及产量的影响

赵德明<sup>1</sup>, 柴守玺<sup>2</sup>, 黄彩霞<sup>3</sup>, 张梅花<sup>3</sup>

(1. 甘肃省工程咨询中心, 甘肃 兰州 730030; 2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070;  
3. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 在西北绿洲生态条件下, 设  $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}(\text{N}_1)$ ,  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}(\text{N}_2)$  两个氮素(纯氮)水平和  $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}(\text{P}_1)$ ,  $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}(\text{P}_2)$  两个磷素( $\text{P}_2\text{O}_5$ )水平共 4 个处理, 研究了氮磷配施对冬小麦产量及干物质积累及分配、灌浆特性的影响。结果表明: $\text{N}_2\text{P}_1$ 、 $\text{N}_2\text{P}_2$  具有较高的籽粒产量, 分别为  $7\ 644.73$ 、 $7\ 686.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 同时, 水分利用效率(WUE)也较高, 分别为  $11.67$ 、 $11.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ; 千粒重和穗粒数随施氮量增加而提高, 磷对籽粒产量构成要素影响不显著; 氮、氮和磷互作对籽粒平均灌浆速率( $V$ )、最大灌浆速率( $V_{\max}$ )、有效灌浆持续期粒重增加值( $W_s$ )和有效灌浆持续期灌浆速率( $V_s$ )均有显著影响, 但影响籽粒重量的主要因素是  $V_{\max}$ ; 氮、磷及氮和磷互作对不同器官干物质积累及其分配影响在不同生育时期表现不一。

**关键词:** 氮磷肥; 干物质; 产量; 冬小麦; 绿洲生态条件

**中图分类号:** S512.1<sup>+</sup>1; S506.2 **文献标志码:** A

## Effects of nitrogen and phosphorus fertilizer on dry matter distribution and grain yield of winter wheat in the ecological conditions of oasis

ZHAO De-ming<sup>1</sup>, CHAI Shou-xi<sup>2</sup>, HUANG Cai-xia<sup>3</sup>, ZHANG Mei-hua<sup>3</sup>

(1. Gansu Consulting Engineering, Lanzhou, Gansu 730030, China;

2. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** The effects of nitrogen and phosphorus fertilizer on dry matter distribution, grain filling and grain yield of winter wheat were investigated in the ecological conditions of northwest oasis of China. Four treatments comprised of two nitrogen levels ( $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) and twophosphorus levels ( $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ). The results showed that  $\text{N}_2\text{P}_1$  and  $\text{N}_2\text{P}_2$  had higher grain yields of  $7\ 644.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $7\ 686.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and higher water use efficiency (WUE) of  $11.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$  and  $11.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ , respectively. The grain weight and grain number increased with nitrogen application rates, but the effect of phosphate fertilizer on the yield components was not significant. Further, there weresignificant effects of nitrogen, phosphorus and  $\text{N} \times \text{P}$  interaction on the average rate of grain filling ( $V$ ), the maximum filling rate ( $V_{\max}$ ), the increased grain weight number ( $W_s$ ) and rate of the effective and continuous period of grain filling ( $V_s$ ), while dry matter accumulation and distribution of winter wheat was significantly different at each growth stage.

**Keywords:** nitrogen and phosphorus fertilizer; dry matter; grain yield; winter wheat; ecological conditions of oasis

河西绿洲农业区是我国西北内陆著名的灌溉农业区和主要的商品粮基地。近年来,为增加冬春季地表覆盖,减少扬尘,阻遏沙尘暴的发生,西北绿洲区提出改种冬小麦的举措<sup>[1]</sup>。但目前对该区域冬麦

北移后的高产高效栽培体系尚未形成,因此,亟待探索有利于冬小麦高效增产的农艺措施。

氮、磷是作物生长发育所需的重要元素,也是西北绿洲区土壤缺乏元素,施肥对当地冬小麦生长发

育影响较大。前人关于氮、磷营养对小麦生长发育的影响进行了大量的研究<sup>[2-5]</sup>,结果表明,适量增施氮肥能够促进开花后营养器官贮存性光合产物向籽粒中的运转,提高粒重,增加籽粒产量,但当施氮量超过一定量时,氮素在籽粒中的分配比例降低,在茎和叶的分配量及比例增加<sup>[6]</sup>,造成营养生长过剩,干物质转移量和转移效率等都会下降,产量降低<sup>[7]</sup>。磷肥会增加气孔导度和叶肉细胞 CO<sub>2</sub> 同化能力,提高光合速率,影响小麦生长过程<sup>[8-11]</sup>。姜宗庆等<sup>[12]</sup>研究表明施磷量(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为 108 kg·hm<sup>-2</sup>时叶面积指数(LAI)、植株茎蘖数、茎蘖成穗率、干物质积累量、花后干物质积累量和籽粒产量最高。当施磷量超过 108 kg·hm<sup>-2</sup>时,相关物质生产指标则呈下降趋势。王荣辉等<sup>[13]</sup>研究表明高量施磷使生长后期作物的水分、生物量及氮磷钾养分损失增加,从而导致了冬小麦产量降低,施肥增产效应降低。

小麦籽粒产量的形成涉及光合物质生产、转运及向籽粒中分配累积等众多过程<sup>[14-15]</sup>,既受花前贮藏物质的调节,又受花后光合能力的限制,不同品种、不同环境下同化物转运量有较大差异<sup>[5,16-17]</sup>。因此,通过田间试验,研究甘肃河西走廊地区不同氮磷肥组合对冬小麦叶面积指数、干物质积累及分配、籽粒灌浆等一系列指标的差异及其对籽粒产量的影响机制,可为区域冬小麦高产、高效生产体系的建立提供理论依据和技术支持,同时在生态学领域具有重要的学术意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2009 年 9 月—2010 年 8 月在武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学试验农场进行,该灌区位于甘肃省河西走廊东端(37°52′20″N,102°50′50″E),海拔约 1 776 m。土壤质地为灌淤土,播前测定耕层 0~30 cm 土壤基本理化指标为:土壤容重 1.12~1.39 g·cm<sup>-3</sup>,全氮 0.77 g·kg<sup>-1</sup>,速效氮 49.20 mg·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.14 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷 9.11 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 93.95 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 值 8.50。该区域年均降雨量 160 mm,年蒸发量为 1 919 mm,年日照时数 2 945 h,年平均气温 7.8℃,1 月份最低气温 -11.8℃,7 月份最高气温 24.0℃,≥0℃的积温为 3 513.4℃,年均沙尘暴日数为 9 d,属典型的内陆型干旱气候。

### 1.2 试验设计

试验设 165 kg·hm<sup>-2</sup>,225 kg·hm<sup>-2</sup> 个氮素(纯氮)水平,分别记为 N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>,设 105 kg·hm<sup>-2</sup>、165 kg·hm<sup>-2</sup> 个磷素(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)水平,分别记为 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>,共设

4 个处理,分别为: N<sub>1</sub>P<sub>1</sub>、N<sub>1</sub>P<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>。所用氮、磷肥种类分别为尿素(含纯氮 46%)和过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 14%),其中氮、磷肥均作为基肥一次性施入。试验小区面积 18 m<sup>2</sup>(6 m×3 m),采用随机区组设计,3 次重复。冬小麦供试品种临抗 2 号,播种量 675 kg·hm<sup>-2</sup>。各处理灌溉制度一致,越冬期灌水 1 800 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,拔节期、抽穗期、灌浆期灌水量均为 1 050 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>。田间管理按照高产田进行。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 LAI 测定 在各个生育时期用美国生产的 LP-80 冠层分析系统测定。

1.3.2 地上部干物质 在冬小麦关键生育时期,每个小区取样 20 株,根据植株的器官发育情况,将样品植株按照叶、茎+叶鞘、穗轴+颖壳+籽粒等器官分样,105℃杀青 1 h 后,于 80℃烘至恒重,称其干重,然后计算地上部单株干物质重及器官占单株干重的比例。

1.3.3 籽粒灌浆特征参数的计算 开花后第 5 天开始取样,之后每 3 天测定一次,直至完熟。各处理每次取 10 穗,取穗中部小穗籽粒 10 粒,共 100 粒,称籽粒鲜重。经 105℃杀青后,在 70℃下烘干至恒重。参照马新明等<sup>[18]</sup>的方法采用三次多项式  $f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$  对籽粒灌浆过程进行拟合,其参数分别计算如下:籽粒灌浆持续期(S):令  $f'(x) = 3ax^2 + 2bx + c = 0$ ,求得灌浆起始、终止的时间  $x_1$  和  $x_2$  ( $x_1 < x_2$ ),则籽粒灌浆持续期(S) =  $x_2 - x_1$ 。理论最大粒重(W)和平均灌浆速率(V):将籽粒灌浆终止时间  $x_2$  代入粒重增长方程,得理论最大粒重(W) =  $ax_2^3 + bx_2^2 + cx_2 + d$ ,理论最大粒重除以籽粒灌浆持续期,即得平均灌浆速率(V) =  $W/S$ 。

最大籽粒灌浆速率出现时间(T):对  $f(x)$  二次求导并令导数为 0,求得  $x = -2b/6a$ ,即为最大籽粒灌浆速率出现时间(T)。最大灌浆速率(V<sub>max</sub>):将最大籽粒灌浆速率出现时间(T)代入籽粒灌浆速率方程  $f'(T) = 3aT^2 + 2bT + c$ ,求得最大灌浆速率(V<sub>max</sub>)。有效灌浆持续期(S<sub>e</sub>)及有效灌浆持续期灌浆速率(V<sub>s</sub>):把籽粒灌浆曲线的线性增长阶段定义为该曲线的斜率 ≥ 1 的部分<sup>[19]</sup>,令  $f'(x) = 3ax^2 + 2bx + c = 0.1$ ,求得  $x'_1$  和  $x'_2$  ( $x'_1 < x'_2$ ),有效灌浆持续期(S<sub>e</sub>) =  $x'_2 - x'_1$ 。有效灌浆持续期粒重增加值(W<sub>s</sub>) =  $ax'_2^3 + bx'_2^2 + cx'_2 + d - (ax'_1^3 + bx'_1^2 + cx'_1 + d)$  和有效灌浆持续期灌浆速率(V<sub>s</sub>) =  $W_s/S_e$ 。

1.3.4 水分利用效率(WUE) 播前和收获后用烘干法测定 0~10、10~30、30~60、60~90、90~120、120~150 cm 各层土壤含水量,计算水分利用效率(WUE)。WUE (kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>) = 经济产量/ET。

作物生长期间的蒸散量 ( $ET$ ) 计算:  $ET(\text{mm}) = I + P - \Delta S$ , 其中  $I$  是作物生长期间的灌水量 ( $\text{mm}$ ),  $P$  是作物生长期间的降水量 ( $\text{mm}$ ),  $\Delta S$  是收获期与播种期土壤剖面水分含量 ( $\text{mm}$ ) 之差。

1.3.5 产量构成因素 完熟期, 每小区各选 20 株进行常规考种, 并结合实收测产。

#### 1.4 数据处理

用 Excel 处理数据和制图, 用 SPSS17.0 进行单因素和多因素方差分析, 并对数据进行显著性检验和互作效应方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮磷肥配施对冬小麦籽粒产量及其构成因素的影响

由表 1 可以看出, 随着田间施氮量和施磷量的增加, 穗粒数和千粒重都逐渐增加, 不同氮素水平下

穗粒数和千粒重均存在显著或极显著差异, 磷素间差异不显著, 但氮、磷及氮磷肥互作对产量的影响均达到了显著或极显著水平。N<sub>2</sub>P<sub>2</sub> 处理籽粒产量最高, 为 7 686.25 kg·hm<sup>-2</sup>, 与 N<sub>1</sub>P<sub>1</sub>、N<sub>1</sub>P<sub>2</sub> 处理差异显著。氮素对水分利用效率 (WUE) 影响达到极显著水平, 磷或氮磷肥互作效应不明显。N<sub>2</sub>P<sub>1</sub> 处理 WUE 最高, 为 11.67 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>, 但与 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub> 处理差异不显著。综合考虑, N<sub>2</sub>P<sub>1</sub> 处理是较理想的施肥方案。

### 2.2 氮磷肥配施对冬小麦叶面积指数 (LAI) 的影响

随着生育期推进, 叶面积指数 (LAI) 逐渐增加, 至抽穗期达到最大值后又逐渐下降 (图 1)。处理间各生育期 LAI 表现为 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub> > N<sub>2</sub>P<sub>1</sub> > N<sub>1</sub>P<sub>2</sub> > N<sub>1</sub>P<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>P<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>P<sub>1</sub> 二者相近无显著差异, 但在抽穗期及灌浆初期显著高于其他处理。进一步分析表明, 氮肥对 LAI 的影响大于磷肥, 氮磷肥互作效应不显著。

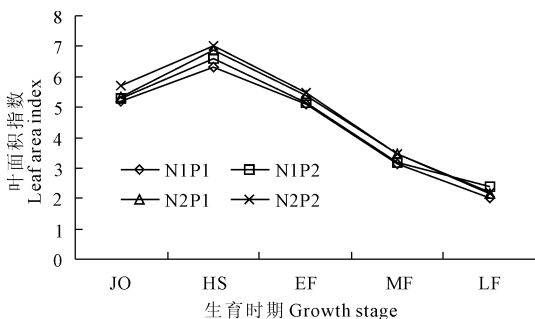
表 1 氮磷肥配施对冬小麦籽粒产量及产量构成要素的影响

Table 1 Effects of combined nitrogen and phosphorus fertilizers on yield and its components of winter wheat

处理 Treatments	穗数 Spike number /(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1000-grain weight /g	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率 WUE /(kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	879.77aA	20.27bB	50.63cB	6753.38cC	11.09bB
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	903.79aA	21.43abAB	51.41bcB	7098.79bB	11.14bB
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub>	882.11aA	21.95aAB	52.55abAB	7644.73aA	11.67aA
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	897.12aA	22.73aA	53.55aA	7686.25aA	11.49aAB
F <sub>N</sub>	3.36	9.52*	23.97**	199.13**	19.78**
F <sub>P</sub>	0.63	4.07	4.65	9.53*	0.37
F <sub>N×P</sub>	3.02	0.16	0.07	5.57*	1.1640

注: 数值后的小写和大写字母分别表示  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  的显著水平 (LSD 检验法)。

Note: The data followed by different small and capital letters are significant at 5% and 1% levels.



注: JO, 拔节期; HS, 抽穗期; EF, 灌浆初期; MF, 灌浆中期; LF, 灌浆后期。下同。

Note: JO, jointing; HS, heading stage; EF, early grain filling stage; MF, middle grain filling stage; LF, later grain filling stage. The same below.

图 1 氮磷肥配施对冬小麦叶面积指数 (LAI) 的影响

Fig. 1 Effects of fertilizers on leaf area accumulation of winter wheat

### 2.3 氮磷肥配施对冬小麦干物质积累及分配的影响

冬小麦干物质积累量 (图 2) 随生育时期推进呈“慢-快-慢”的变化趋势, 成熟期达到最高值。处理间在拔节期、开花期、灌浆中期及成熟期均存在显著差异。多因素方差分析表明, 氮、磷及氮磷肥互作效应对冬小麦地上部干物质积累均有一定的影响, 籽粒产量最高的 N<sub>2</sub>P<sub>2</sub> 在拔节~成熟期干物质质量最大, 说明在本试验设计范围内, 提高氮、磷量可促进冬小麦生物生长, 这也为提高籽粒产量奠定了物质基础。

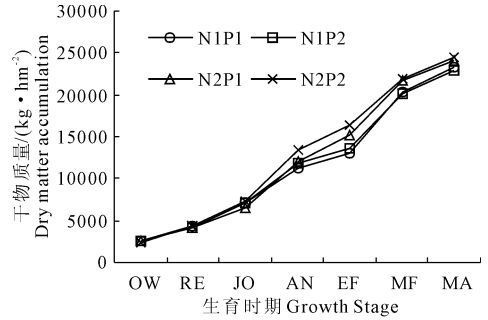
从花后不同生育时期地上各器官干物质积累及分配 (表 2) 来看, 随生育时期的推进, 茎秆 + 叶鞘、叶片干物质占地上干物质总量的比例逐步下降, 穗轴 + 颖壳 + 籽粒干物质逐步上升, 至灌浆后期, 穗轴 + 颖壳 + 籽粒干物质占地上干物质 50% 以上, 表明开花后, 干物质主要向穗部供应。不同氮磷肥组合

间穗轴 + 颖壳 + 籽粒干物质在开花期 ~ 灌浆后期均存在显著或极显著差异,茎秆 + 叶鞘、叶片干物质在开花 ~ 灌浆中期处理间无显著性差异,灌浆后期存在显著差异,这与灌浆后期冬小麦营养器官同化物向籽粒转运有关。多因素方差分析表明,影响穗轴 + 颖壳 + 籽粒干物质积累的主要因素开花期为氮,灌浆前期和中期为磷,灌浆后期为氮磷肥互作效应。影响茎秆 + 叶鞘、叶片灌浆后期干物质转运的主要因素为氮。

2.4 氮磷肥配施对冬小麦籽粒灌浆特征参数的影响

表 3 表明,在籽粒灌浆特征参数中,氮磷肥配施对平均灌浆速率  $V$ 、最大灌浆速率  $V_{max}$ 、有效灌浆持续期粒重增加值  $W_s$  和有效灌浆持续期灌浆速率  $V_s$  均具有显著或极显著差异,影响上述参数的主要因素是氮和氮磷肥互作,磷因素间无显著差异。有效灌浆持续期  $S_e$  无显著差异。进一步分析表明(表

4),籽粒产量和千粒重与  $V_{max}$  呈显著正相关,与其余灌浆特征参数相关不显著,说明影响籽粒重量的主要因素是  $V_{max}$ 。



注:OW,越冬期;RE,返青期;AN,开花期;MA,成熟期。其它同图 1。  
Note: OW, overwintering; RE, reviving; AN, flowering; MA, mature stage. The others are the same as the Fig.1.

图 2 氮磷肥配施对冬小麦干物质积累量的影响

Fig.2 Effects of fertilizers on dry matter index of winter wheat

表 2 氮磷肥配施对冬小麦地上器官干物质分配的影响

Table 2 Effects of fertilizers on dry matter partitioning of aboveground winter wheat

处理 Treatments		开花期 AN		灌浆初期 EF		灌浆中期 MF		灌浆后期 LF	
		干物质 Dry mater /(g·stalk <sup>-1</sup> )	分配比例 Distributi- on ratio /%	干物质 Dry mater /(g·stalk <sup>-1</sup> )	分配比例 Distributi- on ratio /%	干物质 Dry mater /(g·stalk <sup>-1</sup> )	分配比例 Distributi- on ratio /%	干物质 Dry mater /(g·stalk <sup>-1</sup> )	分配比例 Distributi- on ratio /%
茎秆 + 叶鞘 Stem + Sheath	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	0.880aA	69.15aA	0.958aA	63.73 aA	1.197aA	53.61aA	0.850abA	37.99aA
	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	0.896aA	67.21aA	0.955aA	62.23aA	1.181aA	52.41aA	0.835bA	38.06aA
	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub>	0.944aA	68.97aA	1.021aA	59.99aA	1.189aA	50.60aA	0.893aA	38.96aA
	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	0.984aA	69.24aA	1.127aA	63.10aA	1.214aA	51.88aA	0.889aA	37.01aA
叶片 Leaf	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	0.216aA	17.04aA	0.211aA	13.98aA	0.218aA	9.80aA	0.228abA	10.15aA
	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	0.233aA	17.47aA	0.224aA	14.62aA	0.241aA	10.85aA	0.201bA	9.13aA
	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub>	0.242aA	17.68aA	0.227aA	13.26aA	0.210aA	8.91aA	0.229abA	10.01aA
	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	0.221aA	15.55aA	0.242aA	13.57aA	0.215aA	9.2aA	0.250aA	10.4aA
穗轴 + 颖壳 + 籽粒 Cob + glume + grain	N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	0.176bA	13.81aA	0.336bA	22.28bA	0.816bA	36.59aA	1.158bA	51.86bA
	N <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	0.204abA	15.31aA	0.355bA	23.15abA	0.828abA	36.74aA	1.159bA	52.81aA
	N <sub>2</sub> P <sub>1</sub>	0.182bA	13.35aA	0.459aA	26.75aA	0.95aA	40.49aA	1.169bA	51.03bA
	N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	0.217bA	14.14aA	0.417abA	23.34abA	0.911abA	38.92aA	1.261aA	52.59aA

表 3 氮磷肥配施对冬小麦籽粒灌浆特征参数的影响

Table 3 Effects of fertilizers on grain filling characteristics of winter wheat

处理 Treatments	平均灌浆速率 $V$ /(g·100 粒 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	最大灌浆速率 $V_{max}$ /(g·100 粒 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	有效灌浆持续 $S_e$ /d	有效灌浆持续期 粒重增加值 $W_s$ /g	有效灌浆持续期 灌浆速率 $V_s$ /(g·d <sup>-1</sup> )
N <sub>1</sub> P <sub>1</sub>	0.139bB	0.199bB	34.926aA	5.509abA	0.186aA
N <sub>1</sub> P <sub>2</sub>	0.159aA	0.208aA	35.955aA	7.303aA	0.203bB
N <sub>2</sub> P <sub>1</sub>	0.165aA	0.215aA	36.569aA	5.646bA	0.213cB
N <sub>2</sub> P <sub>2</sub>	0.157aA	0.223aA	35.228aA	7.094aA	0.202bB
平均 Mean	0.155	0.21875	33.1695	6.638	0.201
CV/%	7.223	6.092	13.330	11.175	5.555

注 Note:  $V$  - the average filling rate;  $V_{max}$  - the maximum filling rate;  $S_e$  - valid and continuous period of grain filling;  $W_s$  - the increased grain weight number;  $V_s$  - rate of the effective and continuous period of grain filling. 下同 The same below.

表 4 氮磷肥配施条件下冬小麦籽粒灌浆参数与千粒重和籽粒产量的相关性

Table 4 Correlation analysis between grain filling characteristics and yield, 1000-grain weight of winter wheat under different fertilization treatments

项目 Items	平均灌浆速率 $V$	最大灌浆速率 $V_{\max}$	有效灌浆 持续期 $S$	有效灌浆持续期粒 重增加值 $W_s$	有效灌浆持续期 $V_s$
千粒重 1000-grain weight	0.4300	0.92*	0.1300	0.3400	0.3700
籽粒产量 Grain yield	0.8000	0.96*	-0.5000	-0.2300	0.8200

注: \* 代表  $P < 0.05$  的显著水平。

Note: \* indicated a significance level at  $P < 0.05$ .

### 3 讨论与结论

小麦在籽粒形成过程中,光合产物的生成、转运及向籽粒中的分配累积能力是制约产量的重要因素。不同的生态生产条件,肥料对产量及其构成要素的影响可能不同。刘兴海等研究表明,小麦中后期追施适量氮肥使千粒重明显增加<sup>[20]</sup>,随着施氮量的增加,小麦的千粒重降低,这主要与施氮的增穗作用有关<sup>[21]</sup>;Jeufforu M. H 等认为,氮肥主要影响小麦穗粒数,进而影响籽粒产量的高低<sup>[22]</sup>;也有研究发现施肥对粒重影响较大<sup>[23]</sup>;曾广伟等<sup>[9]</sup>认为在施磷 75 ~ 150 kg·hm<sup>-2</sup> 范围内,穗数、千粒重以及产量随着施磷量的增加而增加,高于 150 kg·hm<sup>-2</sup> 时反而下降。本研究结果表明,氮、磷及氮磷肥互作对产量均有显著影响,在施氮 165 ~ 225 kg·hm<sup>-2</sup> 范围内,千粒重和穗粒数随施氮量增加而提高,在施磷 105 ~ 165 kg·hm<sup>-2</sup> 范围内,磷对籽粒产量构成要素影响不显著, N<sub>2</sub>P<sub>1</sub> 为推荐施肥方案。

研究表明,增施氮肥,茎鞘干物质花前积累量、花后贮藏量、总输出量、输出率均增加<sup>[24]</sup>。于振文等<sup>[25]</sup>认为,不同品种对氮肥的反应程度不同,增施氮肥使高产小麦品种鲁麦 22 灌浆期同化<sup>14</sup>C 向籽粒中分配率增加,旗叶、茎中分配率下降。施氮量达到 300 kg·hm<sup>-2</sup> 时则不利于干物质转移<sup>[26]</sup>。施磷 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 可以增加冬小麦干物质积累量和籽粒产量,但当超过一定量时会造成减产<sup>[9,12-13]</sup>,岳寿松等<sup>[27]</sup>研究表明,在缺磷土壤中,施用磷肥使小麦显著增产,且土壤速效磷含量越低,施磷增产效果越显著,同时产量亦随施磷量的增加而增加。在本实验条件下,影响穗轴+颖壳+籽粒干物质积累的主要因素开花期为氮,灌浆前期和中期为磷,灌浆后期为氮磷肥互作效应,这可能是由于施磷延缓了小麦生育后期的 LAI 下降,形成了更多的光合产物,为籽粒提供了物质基础<sup>[9]</sup>,而增施氮肥提高了灌浆后期营养器官干物质向籽粒的转移量<sup>[7]</sup>。

从籽粒灌浆过程来看,蔡庆生等<sup>[28]</sup>认为,灌浆

速率与粒重呈正相关,灌浆持续天数与粒重关系不大。冯素伟等<sup>[29]</sup>研究表明粒重主要是由快增期持续时间和灌浆速度决定的,与整个灌浆持续期关系不明显,在小麦灌浆快增期,灌浆速度越快,持续时间越长,干物质积累越多,粒重就越高。马新明等<sup>[18]</sup>研究表明,不同品种粒重与籽粒灌浆特性指标的相关性不一致。本研究表明,籽粒产量和千粒重与  $V_{\max}$  呈显著正相关,说明影响籽粒重量的主要因素是  $V_{\max}$ 。氮、磷组合处理间  $V$ 、 $V_{\max}$ 、 $W_s$ 、 $V_s$  均具有显著或及显著差异,影响各参数的主要因素是氮和氮×磷互作,磷因素间没有显著性差异。这与李国强等<sup>[30]</sup>研究结论一致。据李世清等<sup>[19]</sup>研究,小麦籽粒灌浆受本身的遗传性和环境因素影响,灌浆速率是决定籽粒重量的关键性参数,而灌浆持续期与籽粒重量间的相互关系仍有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 黄彩霞,柴守玺,赵德明,等.不同水分处理对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J].草业学报,2010,19(5):196-203.
- [2] 鲁清林,叶石,何春雨,等.冬麦北移后小麦籽粒灌浆特性的初步研究[J].麦类作物学报,2008,28(2):281-286.
- [3] F. Álvaro, C. Royo, L. F. García del Moral, et al. Grain filling and dry matter translocation responses to source-sink modifications in a historical series of durum wheat[J]. Crop Science, 2008, 48: 1523-1531.
- [4] Richard T Koenig, Craig G Cogger, Andy I Bary. Dryland winter wheat yield, grain protein, and soil nitrogen responses to fertilizer and biosolids applications[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2011, 1-9.
- [5] Noulas, Christos I, Alexiou. Course of dry matter and nitrogen accumulation of spring wheat genotypes known to vary in parameters of nitrogen use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(8): 1201-1218.
- [6] 周琴,姜东,戴廷波,等.不同基因型小麦籽粒蛋白质和淀粉积累与碳氮转运的关系[J].南京农业大学学报,2002,25(3): 1-4.
- [7] 张法全,王小燕,于振文,等.公顷产 10 000 kg 小麦氮素和干物质积累与分配特性[J].作物学报,2009,35(6):1086-1096.
- [8] 杨晴,韩金玲,李雁鸣,等.不同施磷量对小麦旗叶光合性能和产量性状的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(6):816-

- 821.
- [9] 曾广伟,兰进好,刘义国,等.不同土壤水分条件下施磷对小麦光合性能和产量影响比较[J].干旱地农业研究,2009,27(5):41-46.
- [10] 山 仑.植物水分利用效率和半干旱地区农业用水[J].植物生理学通讯,1994,(1):61-63.
- [11] 赵海波,林 琪,刘义国,等.氮磷肥配施对超高产冬小麦灌浆期光合日变化及产量的影响[J].应用生态学报,2010,21(10):2545-2550.
- [12] 姜宗庆,封超年.施磷量对小麦物质生产及吸磷特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(5):628-634.
- [13] 王荣辉,王朝辉,李 生.施磷量对旱地小麦氮磷钾和干物质积累及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):115-121.
- [14] 郭文善,封超年,严六零,等.小麦开花后源库关系分析[J].作物学报,1995,21(3):334-340.
- [15] 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):55-57.
- [16] 姜 东,谢祝捷,曹卫星,等.花后干旱和渍水对冬小麦光合特性和物质运转的影响[J].作物学报,2004,30(2):175-182.
- [17] 王小燕,于振文.大穗型和中穗型小麦品种光合特性的差异及其与粒重和产量的关系[J].西北植物学报,2005,25(10):1976-1982.
- [18] 马新明,张娟娟,熊淑萍,等.氮肥用量对不同品质类型小麦品种籽粒灌浆特征和产量的影响[J].麦类作物学报,2005,25(6):72-77.
- [19] 李世清,邵明安,李紫燕,等.小麦籽粒灌浆特征及影响因素的研究进展[J].西北植物学报,2003,23(11):2031-2039.
- [20] 刘兴海,王树安.冬小麦抗逆栽培技术原理的研究Ⅲ.中后期重施氮肥对小麦灌浆过程的影响[J].华北农学报,1986,1(4):8-14.
- [21] 李科江,张西科,刘文菊,等.不同栽培措施下冬小麦灌浆模拟研究[J].华北农学报,2001,16(2):70-74.
- [22] Jeuffroy M H. Intensity and during of nitrogen deficiency on wheat grain number[J]. Crop Science, 1999,39:1385-1393.
- [23] 张国平.小麦粒重的变异与调控[J].江苏农学院学报,1996,17:98-105.
- [24] 郭文善,方明奎,王蔚华,等.氮素对小麦茎鞘物质贮运和籽粒发育的调节效应[J].江苏农业研究,2001,22(4):1-4.
- [25] 于振文,潘庆民,姜 东,等.9 000 kg/公顷小麦施氮量与生理特性分析[J].作物学报,2003,29(1):37-43.
- [26] 马东辉,王月福,周 华,等.氮肥和花后土壤含水量对小麦干物质积累、运转及产量的影响[J].麦类作物学报,2007,27(5):847-851.
- [27] 岳寿松,于振文.磷对冬小麦后期生长及产量的影响[J].山东农业科学,1994,(1):13-15.
- [28] 蔡庆生,吴兆苏.小麦籽粒生长各阶段干物质积累与粒重的关系[J].南京农业大学学报,1993,16(1):27-32.
- [29] 冯素伟,胡铁柱,李 淦.不同小麦品种籽粒灌浆特性分析[J].麦类作物学报,2009,29(4):643-646.
- [30] 李国强,汤 亮.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.

(上接第 74 页)

- [20] Clough T J, Bertram J E, Ray J L, et al. Unweathered wood biochar impact on nitrous oxide emissions from a bovine - urine - amended pasture soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3):852-860.
- [21] 王晓辉,郭光霞,郑瑞伦,等.生物炭对设施退化土壤氮相关功能微生物群落丰度的影响[J].土壤学报,2013,50(3):624-631.
- [22] Clough T J, Condon L M, Kamman C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics[J]. Agronomy, 2013,3(2):275-293.
- [23] Torbert H A, Mulvaney R L, Huevel R M V, et al. Soil type and moisture regime effects on fertilizer efficiency calculation methods in a nitrogen - 15 tracer study[J]. Agronomy Journal, 1992, 84(1):66-70.
- [24] 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783.
- [25] 甘建民,孟 盈,郑 征,等.施肥对热带雨林下种植砂仁土壤氮矿化和硝化作用的影响[J].农业环境科学学报,2003,22(2):174-177.
- [26] Darrah P R, Nye P H, White R E. The effect of high solute concentrations on nitrification rates in soil[J]. Plant and Soil, 1987, 97(1):37-45.
- [27] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006,70(5):1719-1730.
- [28] Spokas K A, Novak J M, Venterea R T. Biochar's role as an alternative N - fertilizer: Ammonia capture[J]. Plant and soil, 2012,350(1-2):35-42.
- [29] Taghizadeh - Toosi A, Clough T J, Sherlock R R, et al. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable[J]. Plant and soil, 2012,350(1-2):57-69.
- [30] Mohan S V, Karthikeyan J. Removal of lignin and tannin colour from aqueous solution by adsorption onto activated charcoal[J]. Environmental Pollution, 1997,97(1-2):183-187.
- [31] Sudhakar Y, Dikshit A K. Kinetics of endosulfan sorption on to wood charcoal[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 1999,34(4):587-615.
- [32] Streubel J D, Collins H P, Garcia - Perez M, et al. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(4):1402-1413.