

# 北疆地区高产滴灌春小麦干物质积累和氮磷营养特性

张春燕,张新疆,王娟,李沛玟,马伟栋,陈国永,李再欣,危常州

(石河子大学农学院,新疆石河子 832003)

**摘要:**为探究北疆地区高产( $>9\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )滴灌春小麦干物质积累特征和氮磷营养特征,以新春44为供试品种,设置5个施磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )量处理,分别为 $0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P0)、 $30\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P1)、 $90\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P2)、 $150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P3)、 $210\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P4),建立北疆地区春小麦不同产量水平,分析不同产量下春小麦干物质积累转运利用和氮磷营养特征。结果表明,适宜的磷肥施用量对春小麦干物质积累转运分配、氮磷营养特征及产量均有促进作用。当施磷量从 $0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加至 $210\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,产量呈先增加后降低趋势,在施磷150和 $210\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时均达到高产水平,产量分别为 $9\ 401.59$ 和 $9\ 080.63\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。5个施磷量处理中,干物质积累、转运和分配,及氮磷素积累、转运和分配均以施磷 $150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 最佳。在施磷150和 $210\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的高产水平下,春小麦均有较高水平的氮素和磷素生产效率,分别平均为 $29.98$ 和 $94.80\ \text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此,在北疆滴灌春小麦种植模式下,适宜的磷肥施用量可以提高春小麦的产量,使高产春小麦具有较高水平的干物质积累和转运能力以及养分吸收和利用能力。在本试验条件下,施磷量( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) $150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 是兼顾春小麦产量和养分利用的最佳用量。

**关键词:**春小麦;磷肥施用量;生理特征;氮磷营养特征;产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)05-0642-10

## Dry Matter Accumulation and N and P Nutrition Characteristics of High Yield Drip Irrigation Spring Wheat in Northern Xinjiang

ZHANG Chunyan, ZHANG Xinjiang, WANG Juan, LI Peiwen,

MA Weidong, CHEN Guoyong, LI Zaixin, WEI Changzhou

(Agronomy College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** In order to explore the characteristics of dry matter accumulation and N and P nutrition of high-yield( $>9\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) drip irrigation spring wheat in northern Xinjiang, a spring wheat variety Xinchun 44 was used as experimental material, and five phosphorus application( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) treatments were set up: $0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P0),  $30\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P1),  $90\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P2),  $150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P3) and  $210\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P4). The different yield levels of spring wheat in northern Xinjiang were established, and characteristics of dry matter accumulation, transport and utilization, nitrogen and phosphorus nutrition characteristics of spring wheat with different yields were analyzed. The results showed that the appropriate amount of phosphorus fertilizer can promote the accumulation, transport and distribution of dry matter, nitrogen and phosphorus nutrition characteristics and yield of spring wheat. When the phosphorus application rate increased from  $0\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  to  $210\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , the yield increased and then decreased, and reached the high yield level at  $150$  and  $210\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , ranging from  $9\ 401.59$  and  $9\ 080.63\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , respectively. Among the five phosphorus application treatments, the accumulation, transport and distribution of dry matter and the accumulation, transport and distribution of nitrogen and phos-

收稿日期:2024-05-28

修回日期:2024-10-09

基金项目:国家农业重点攻关计划项目(NK2022180801)

第一作者 E-mail:19993446670@163.com(张春燕)

通讯作者 E-mail:czwei@shzu.edu.cn(危常州)

phorus were the best at  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  phosphorus application. Under the high yield levels of 150 and  $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , spring wheat had higher nitrogen production efficiency and phosphorus production efficiency, with an average of 29.98 and  $94.80 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Therefore, under the drip irrigation planting mode of spring wheat in northern Xinjiang, the appropriate application amount of phosphorus fertilizer can increase the yield of spring wheat, so that high-yield spring wheat has a higher level of dry matter accumulation and transport capacity, nutrient absorption and utilization capacity, under the experimental conditions. The application amount of  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  is the best dosage, taking the yield and nutrient utilization of spring wheat into account.

**Keywords:** Spring wheat; Phosphate fertilizer application amount; Physiological characteristics; Characteristics of nitrogen and phosphorus nutrition; Yield

小麦是中国的三大粮食作物之一,对保障中国粮食安全具有举足轻重的作用。2023 年中国小麦播种面积共计  $2.3627 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ,小麦总产量为  $1.37 \times 10^8 \text{ t}$ ,其中新疆小麦播种面积为  $1.2092 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占新疆粮食作物总面积的 44.68%<sup>[1]</sup>。优化水肥管理是新疆小麦稳产和增产的关键,但如果不能精确掌握小麦干物质积累和氮磷营养特性,田间施肥易出现不合理现象,使肥料利用率降低,同时也会引起环境污染等问题<sup>[2]</sup>。因此,掌握高产春小麦的生理特性、产量与养分需求规律之间的关系,是实现春小麦丰产优质、高效可持续生产的关键。

磷是植物生长的主要营养素之一。通过施用磷肥来满足作物对磷的需求和提高作物产量是必要的<sup>[3]</sup>,但目前农业生产中为追求高产,磷肥投入量普遍较高,且施入土壤后磷肥只有少量被当季作物吸收,大量的磷残留在土壤中,导致磷肥利用率低。据统计,中国磷肥当季利用率只有 15%~20%<sup>[4-5]</sup>。过量和不合理的施用磷肥使磷资源严重浪费并造成许多环境问题<sup>[6]</sup>。所以,合理施用磷肥有利于促进作物生长发育和产量的增加,节约资源并保护环境。在新疆有关沙壤土上,施磷结合立体匀播能使更多的氮、磷向春小麦籽粒转运,促进单位面积穗数和千粒重的提高,且在施磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^2$ 时小麦可获得高产<sup>[7]</sup>。研究表明,增施磷肥还可以增加小麦干物质积累、单穗干重量和穗粒数促进干物质向籽粒中分配<sup>[8]</sup>,有利于植株分蘖,增加株高<sup>[9]</sup>,改善小麦开花期旗叶光反应中心活性,强化净光合速率<sup>[10]</sup>,从而提高小麦产量。也有研究发现,施磷增加了土壤供磷能力<sup>[11]</sup>,但过量施磷会抑制作物对土壤矿质养分的吸收,进而降低作物的产量<sup>[12]</sup>。因此,合理的磷肥施用量应根据作物产量与土壤的供磷能力进

行选择,同时还要考虑施磷带来的环境风险。

有关磷肥对小麦干物质积累转运、分配及产量的影响有较多报道,但在北疆地区结合滴灌条件对春小麦干物质积累转运分配、氮磷营养特征及产量的影响的研究尚不多见。本试验在滴灌条件下采用不同施磷量处理,建立北疆地区春小麦不同产量水平,研究不同产量水平下春小麦干物质积累转运、产量及氮磷营养特征,从产量和资源利用效率角度探讨合理的磷肥投入阈值,为北疆地区高产滴灌春小麦筛选适宜的磷肥施用量,以期为保障作物高产、养分高效和实现肥料减施提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于新疆石河子市石河子大学农试场二连( $44^\circ 31' \text{N}$ ,  $86^\circ 05' \text{E}$ ),属温带大陆性气候。2023 年春小麦全生育期平均气温  $18.70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,总降水量为  $52.50 \text{ mm}$ (图 1)。供试土壤类型为灌耕草甸土,质地为壤土,肥力中等,0~20 cm 土层土壤基本理化性质为有机质含量  $26.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮  $1.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮  $86.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $26.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $356.58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,电导率  $279 \text{ } \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ ,pH7.8。

### 1.2 试验设计

供试品种为新春 44。试验采用随机区组设计,设置 0、30、90、150 和  $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  5 个施磷量( $\text{P}_2\text{O}_5$ )处理,分别以 P0、P1、P2、P3 和 P4 表示,每个处理重复 3 次。每个处理的磷肥基施 80%,拔节期、孕穗期、抽穗期和开花期各追施 5%。全生育期共施氮肥  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和钾肥  $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。氮肥各处理均基施 20%,苗期追施 15%,拔节期追施 30%,孕穗期追施 15%,抽

穗期追施 10%，灌浆期追施 10%；钾肥各处理基施 50%，拔节期追施 15%，开花期追施 20%，灌浆期追施 15%。小区面积为 40 m<sup>2</sup> (5 m × 8 m)，小区之间设置 50 cm 保护行。春小麦行间距为 15 cm，播种量为 375 kg · hm<sup>-2</sup>，每公顷基本苗为 600 万株。采用滴灌进行灌溉，滴灌带配置为一管四行，即一条滴灌带灌溉 4 行小麦。小麦于 2023 年 3 月 31 日播种，7 月 15 日收获。全生育期总灌溉量 6 000 m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup>，分 7 次灌溉，病虫害等其他田间管理措施同当地大田。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 植株干物质质量及养分含量的测定

于小麦三叶一心期取样，取样面积以滴灌带为中心取 0.45 m × 0.3 m 的小麦(一个滴灌带控

制幅宽一侧 45 cm 的两行小麦)。后每隔 10 d 取样一次，取样范围为以滴灌带为中心取 0.3 m × 0.3 m 的小麦，每个处理重复 3 次，全生育期共采样 8 次。将植株按茎、叶、籽粒、穗轴+颖壳分离，分装于牛皮纸袋，于 105 °C 杀青 30 min，在 75 °C 下烘干至恒重，待样品冷却后称重，测定植株干物质积累量。烘干后的植株样粉碎过 0.5 mm 筛，装袋以备植株养分的测定。植株氮磷含量采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后测定。

#### 1.3.2 产量的测定

于成熟期每个小区取 1 m<sup>2</sup> 长势均匀的春小麦进行有效穗数(穗上小于 5 个小穗不计入)的调查。每个小区随机选取 30 穗调查穗粒数；每个小区随机选取籽粒测定千粒重，重复 3 次，重复处理

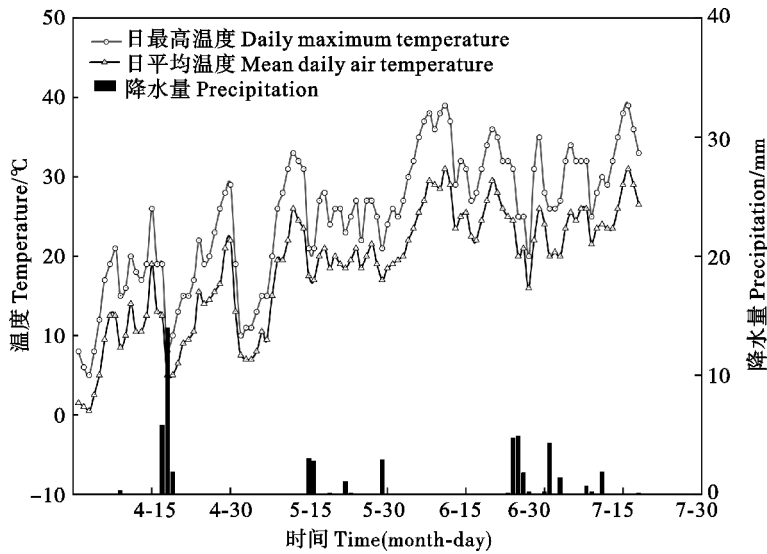


图 1 试验地 2023 年的春小麦生育期气温和降水量

Fig. 1 Temperature and precipitation during spring wheat growth period in 2023 in the test site

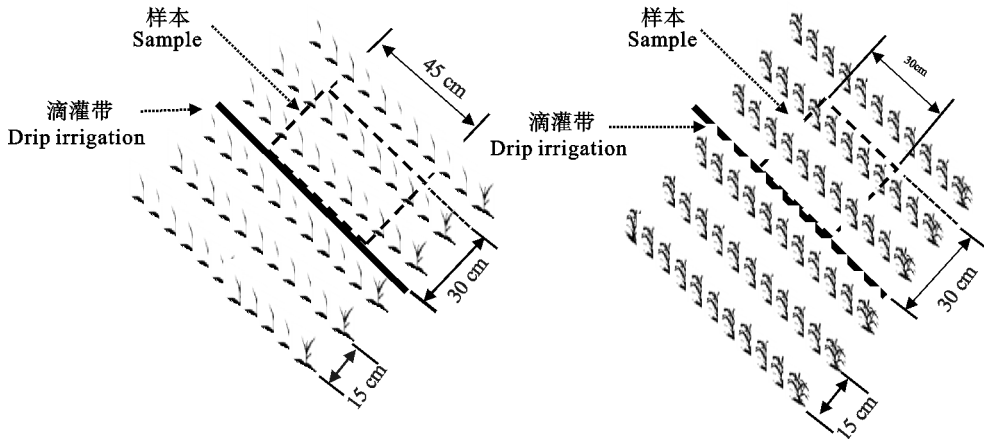


图 2 试验取样方式图

Fig. 2 Diagram of sampling method

间差异需小于 0.5 g, 计算产量。

### 1.4 数据处理与分析

各种干物质指标计算方法如下:

花前干物质转运量 = 开花期营养器官干物质积累量 - 成熟期营养器官干物质积累量

花前干物质转运效率 = 花前干物质转运量 ÷ 开花期营养器官干物质积累量 × 100%

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

花后干物质同化量 = 成熟期籽粒干重 - 花前干物质转运量

花后干物质对籽粒产量的贡献率 = 花后干物质同化量 ÷ 成熟期籽粒干重 × 100%

氮(磷)积累量 = 各期干物质积累 × 同期植株含氮(磷)量

花前氮(磷)转运量 = 开花期营养器官氮(磷)积累量 - 成熟期营养器官氮(磷)积累量

花前氮(磷)对籽粒氮(磷)的贡献率 = 花前氮(磷)转运量 ÷ 成熟期籽粒氮(磷)积累量 × 100%

花后氮(磷)同化量 = 成熟期籽粒氮(磷)积累量 - 花前氮(磷)转运量

花后氮(磷)对籽粒氮(磷)的贡献率 = 花后氮(磷)同化量 ÷ 成熟期籽粒氮(磷)积累量 × 100%

氮(磷)素生产效率 = 籽粒产量 / 地上部氮(磷)积累量

氮(磷)素收获指数 = 籽粒氮(磷)素积累量 / 地上部氮(磷)积累量 × 100%

100 kg 籽粒需磷量 = 成熟期地上部磷积累量 / 成熟期籽粒产量 × 100

试验数据和图表采用 Excel 和 Origin 软件处理, 使用 SPSS 21.0 软件进行统计分析, 采用 Duncan's 法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 高产春小麦籽粒产量及百公斤需磷量的特征

除最高施磷量(P4)处理, 小麦产量随施磷量增加而增加(表 1)。以 9 t · hm<sup>-2</sup> 作为高产春小麦的分界点, P3、P4 处理达到高产水平。与中产处理(P0、P1 和 P2)相比, P3 处理分别增产 48.98%、26.12% 和 13.52%, P4 处理分别增产 43.89%、21.82% 和 9.65%, 主要是因为有效穗数、穗粒数和千粒重增加。与中产处理(P0、P1 和 P2)相比, P3 处理的有效穗数分别增加 13.67%、0.81% 和 3.96%, P4 处理的有效穗数分别增加 15.26%、2.22% 和 5.42%; P3 处理的穗粒数分别增加 17.78%、14.46% 和 7.77%, P4 处理的穗粒数分别增加 7.36%、4.34% 和 -1.76%; P3 处理的千粒重分别增加 11.58%、9.61% 和 1.28%, P4 处理的千粒重分别增加 16.15%、14.15% 和 5.43%。高产组百公斤籽粒需磷量为 0.97~0.98 kg, 高于中产组。这表明, 此地区春小麦从中产到高产的关键是在维持一定的有效穗数和穗粒数的条件下, 增加千粒重。

表 1 不同产量水平下春小麦产量及百公斤需磷量的特征

Table 1 Characteristics of yield and P requirement amount per 100 kg grains of spring wheat at different yield levels

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicles/ (×10 <sup>4</sup> · hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/ (kg · hm <sup>-2</sup> )	100 kg 籽粒需磷量 P requirement amount for 100 kg grains/kg	产量水平 Yield level
P0	439.66 ± 21.32b	38.10 ± 1.97b	44.33 ± 1.88b	6 310.74 ± 514.63c	0.90 ± 0.07a	中产 Middle yield
P1	495.74 ± 15.02ab	39.20 ± 2.86b	45.12 ± 1.99b	7 454.21 ± 687.38bc	0.91 ± 0.03a	
P2	480.72 ± 41.31ab	41.63 ± 2.50ab	48.80 ± 1.50a	8 281.69 ± 416.75ab	0.95 ± 0.02a	
P3	499.75 ± 47.92ab	44.87 ± 1.62a	49.46 ± 1.42a	9 401.59 ± 579.36a	0.98 ± 0.04a	高产 High yield
P4	506.76 ± 27.92a	40.90 ± 1.65ab	51.49 ± 0.17a	9 080.63 ± 810.56a	0.97 ± 0.04a	

同列数值后小写字母代表在 0.05 水平上不同处理间差异显著。下表同。产量 ≥ 9 000 kg · hm<sup>-2</sup> 为高产, 9 000 kg · hm<sup>-2</sup> > 产量 ≥ 6 000 kg · hm<sup>-2</sup> 为中产。

The letters after the values within the same columns mean significant difference among different treatments at 0.05 level. The same in tables 3-5. Yield over 9 000 kg · hm<sup>-2</sup> is high yield, from 6 000 kg · hm<sup>-2</sup> to 9 000 kg · hm<sup>-2</sup> is middle yield.

### 2.2 不同产量水平下春小麦干物质积累特征

#### 2.2.1 不同产量水平下春小麦干物质积累量的变化

不同产量水平下春小麦地上部干物质积累量和生殖器官干物质积累量随着生育期的推进均呈上升趋势,而营养器官干物质积累量则先上升后下降,在出苗后第 57 天时达到峰值(图 3)。在出苗后第 27 天(拔节期)后,施磷提高春小麦的地上部干物质积累量,且随着生育期推进春小麦干物质积累量基均在 P3 处理达到最高。P3 处理开花期干物质积累量达到 16.42 t · hm<sup>-2</sup>,成熟期干物质积累量达到 22.61 t · hm<sup>-2</sup>。

#### 2.2.2 春小麦地上部干物质积累特征值

春小麦地上部生物量和营养器官生物量的 logistic 曲线拟合显示,各处理干物质积累均表现为慢-快-慢趋势(表 2)。与 P0 处理相比,P1、P2、P3 和 P4 处理使春小麦地上部干物质快速积累始期和末期提前,能够有效提高增长速率,有利于春小麦干物质的积累。各处理地上部干物质快速积累阶段为出苗后第 34 天至第 61 天左右(拔节期到开花灌浆初期),干物质积累达到高峰期出苗后第 48 天左右(抽穗期)。与 P0 处理相比,P1、P2、P3 和 P4 处理加快了春小麦生殖器官干物质增长速率,提高速率籽粒灌浆速率,有利于春小麦生殖器官干物质的积累,进而提高产量。各处理生殖器官干物质快速积累始期为出苗后第 53 天左右(即抽穗到开花期),干物质积累达到高峰期

为出苗后第 60 天左右(即灌浆初期)。

#### 2.2.3 不同产量水平下春小麦地上部干物质转运及其对籽粒产量贡献率的特征

表 3 显示,P3 和 P4 春小麦的花前干物质转运量、转运效率以及对籽粒的产量贡献率均处于较高水平,为后期其籽粒生长提供足够碳源,是形成高产的生理原因。P<sub>3</sub> 处理的花前干物质转运量较 P0、P1 和 P2 处理分别增加 41.74%、10.04% 和 4.85%,P4 处理较 P0、P1 和 P2 处理分别增加 40.26%、8.89% 和 3.75%;P3 处理的花前干物质转运效率较 P0、P1 和 P2 处理分别增加 21.71%、2.60% 和 2.42%,P4 与 P0、P1 和 P2 相比,分别增加 21.03%、2.03% 和 1.85%;P3 处理的花前干物质贡献率较 P0、P1 和 P2 处理分别增加 9.39、3.18 和 1.75 个百分点,P4 处理较 P0、P1 和 P2 处理,分别增加 9.02、2.81 和 1.38 个百分点。花后干物质同化量及其献率表现为中产组高于高产组。

### 2.3 高产春小麦氮磷养分吸收的特征

#### 2.3.1 高产春小麦地上部养分积累量的特征

施磷影响春小麦地上部氮、磷素的积累量(图 4)。高产处理组在各生育期都具有较高的氮磷素积累量。在出苗后第 57 天,P3、P4 处理地上部氮素的吸收量平均值为 270.41 kg · hm<sup>-2</sup>,磷素的吸收量为 81.86 kg · hm<sup>-2</sup>。在出苗后第 91 天,P3、P4 处理地上部氮素的吸收量平均值为 308.53 kg · hm<sup>-2</sup>,磷素的吸收量为 97.49 kg · hm<sup>-2</sup>。

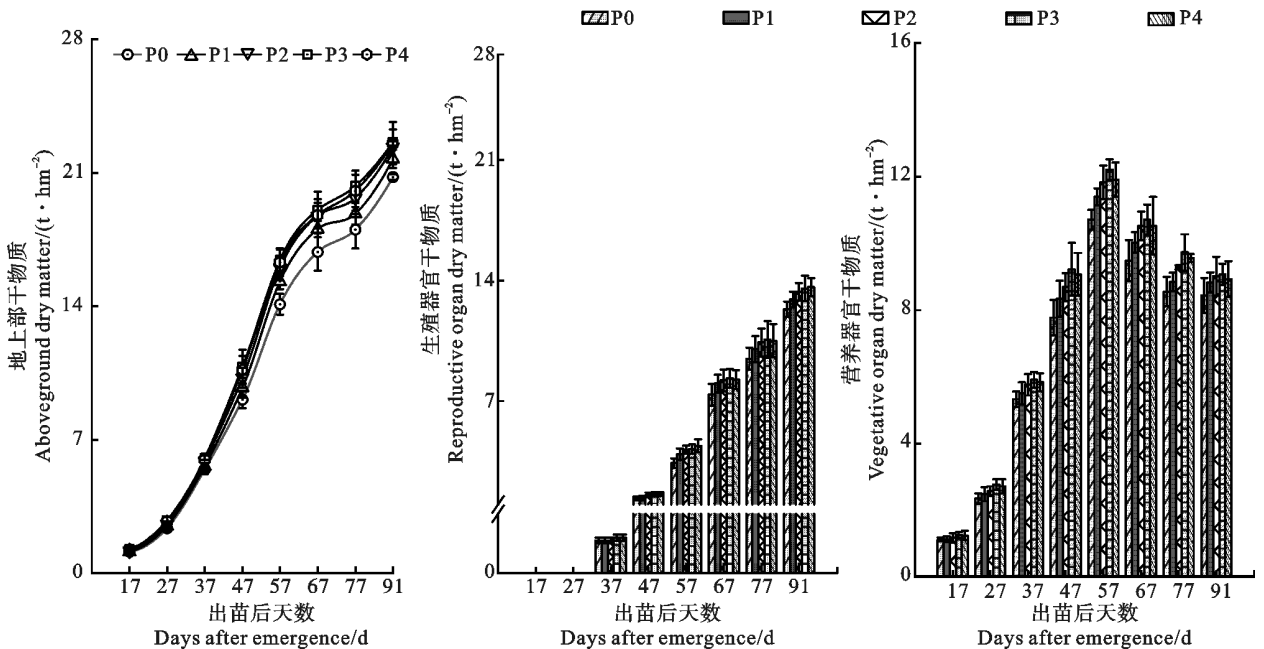


图 3 不同产量水平下春小麦干物质积累动态

Fig. 3 Dynamics of dry matter accumulation of spring wheat under different yield levels

表 2 春小麦干物质积累特征值  
Table 2 Characteristic value of dry matter accumulation of spring wheat plant

部位 Part	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	$V_{max}/$ ( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$t_0/\text{d}$	$t_1/\text{d}$	$t_2/\text{d}$	$t_3/\text{d}$	$V_{av}/$ ( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$R^2$
地上部 Shoot	P0	$y = 21.29 / (1 + 81.10e^{-0.0882t})$	0.47	49.82	34.89	64.74	29.85	0.41	0.9995
	P1	$y = 21.46 / (1 + 88.88e^{-0.0928t})$	0.50	48.37	34.17	62.56	28.39	0.44	0.9975
	P2	$y = 21.94 / (1 + 96.00e^{-0.0954t})$	0.52	47.83	34.03	61.63	27.60	0.46	0.9974
	P3	$y = 22.34 / (1 + 87.91e^{-0.0945t})$	0.53	47.38	33.44	61.32	27.88	0.46	0.9983
	P4	$y = 23.01 / (1 + 82.69e^{-0.0906t})$	0.52	48.75	34.21	63.29	29.08	0.46	0.9996
生殖器官 Reproductive organ	P0	$y = 11.37 / (1 + 83112.11e^{-0.1855t})$	0.53	61.06	53.96	68.16	14.20	0.46	0.9427
	P1	$y = 12.05 / (1 + 103961.33e^{-0.1890t})$	0.57	61.11	54.14	68.07	13.93	0.50	0.9581
	P2	$y = 12.21 / (1 + 138621.62e^{-0.1968t})$	0.60	60.15	53.46	66.84	13.38	0.53	0.9457
	P3	$y = 11.64 / (1 + 124963.29e^{-0.1975t})$	0.57	59.42	52.75	66.08	13.33	0.50	0.9231
	P4	$y = 12.09 / (1 + 140261.67e^{-0.2008t})$	0.61	59.03	52.47	65.59	13.12	0.53	0.9166

$t_0$  表示快速增长高峰期;  $t_1$  和  $t_2$  分别表示快速增长始期和末期;  $t_3$  表示快速增长持续期;  $V_{max}$  表示最大增长速率;  $V_{av}$  表示平均增长速率。

$t_0$  represents the peak period of rapid growth;  $t_1$  and  $t_2$  represent the beginning and end of rapid growth, respectively;  $t_3$  represents the duration of rapid growth;  $V_{max}$  represents the maximum growth rate;  $V_{av}$  represents the average growth rate.

表 3 不同产量水平下春小麦地上部干物质转运及其对籽粒产量贡献率的特征  
Table 3 Characteristics of aboveground dry matter transport and its contribution to grain yield of spring wheat under different yield levels

处理 Treatment	营养器官干物质积累量 Dry matter accumulation in vegetative organs		花前贮存同化物 Pre-anthesis stored assimilates			花后同化物 Post-anthesis assimilates	
	开花期 Anthesis stage/ ( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )	成熟期 Maturity stage/ ( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )	转运量 Translocation amount/ ( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )	转运效率 Translocation rate/%	贡献率 Contribution rate/%	同化量 Assimilation amount/ ( $t \cdot \text{hm}^{-2}$ )	贡献率 Contribution rate/%
P0	14.11±0.55b	11.42±0.58b	2.70±0.11b	19.12±1.15b	28.83±1.5b	6.67±0.51a	71.17±1.5a
P1	15.31±0.41ab	11.84±0.47ab	3.47±0.29a	22.68±1.90a	35.04±1.1a	6.43±0.20a	64.96±1.1b
P2	16.02±0.64a	12.38±0.42a	3.64±0.32a	22.72±1.36a	36.47±2.3a	6.34±0.37a	63.53±2.3b
P3	16.42±0.55a	12.60±0.52a	3.82±0.04a	23.27±0.58a	38.22±1.7a	6.19±0.51a	61.78±1.7b
P4	16.31±0.77a	12.54±0.46a	3.78±0.27a	23.14±0.64a	37.85±4.3a	6.23±0.69a	62.15±4.3b

同列数值后不同字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

Different letters after the values in the same columns indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same in tables 4-6.

### 2.3.2 不同产量水平下春小麦地上部养分转运及其对籽粒贡献率的特征

由表 4 可知,高产处理(P3 和 P4)的春小麦开花期和成熟期营养器官的氮素积累量平均值分别为 270.41 和 69.80  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,较中产处理(P0、P1 和 P2)(平均值 242.50 和 62.21  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )分别增加 11.51% 和 12.20%。P3 和 P4 处理的春小麦花前氮素转运量及其对籽粒氮素的贡献率均处于较高水平。与 P0、P1 和 P2 相比, P3 处理的花前氮素转运量分别增加 24.16%、11.07% 和 3.60%, P4 处理分别增加 21.86%、9.01% 和 1.68%; P3 处理的花前氮素对籽粒氮素的贡献率分别增加 14.63%、8.10% 和 2.49%, P4 处理分别增加 13.75%、7.28% 和 1.71%。花后氮素同化量及其对籽粒氮素贡献率均表现为中

产组高于高产组。

表 5 表明,高产处理(P3 和 P4)的春小麦开花期和成熟期营养器官磷素积累量平均值为 81.86 和 39.28  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,较中产处理(P0、P1 和 P2)(平均值 72.31 和 34.94  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )分别增加 13.21% 和 12.42%。P3 和 P4 处理的春小麦花前磷素转运量及其对籽粒磷素的贡献率均处于较高水平,与 P0、P1 和 P2 相比, P3 处理的花前磷素转运量分别增加 24.88%、16.15% 和 3.21%, P4 处理分别增加 24.64%、15.93% 和 3.01%; P3 处理的花前磷素对籽粒磷素的贡献率分别增加 7.16%、5.49 和 2.22 个百分点, P4 处理分别增加 7.11%、5.44 和 2.17 个百分点。花后磷素同化量及其对籽粒磷素贡献率均表现为中产组高于高产组。

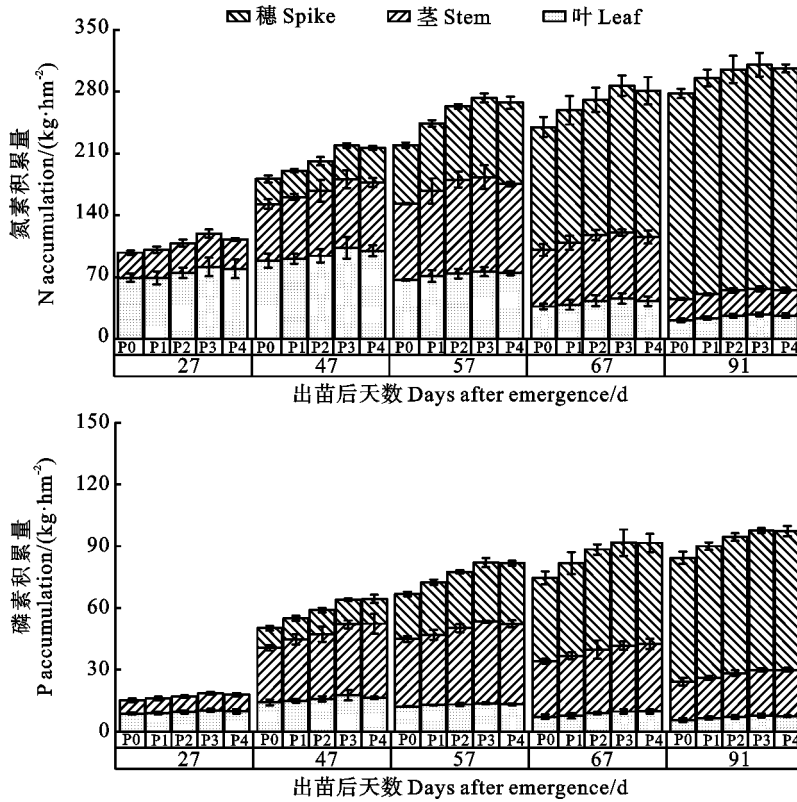


图 4 不同产量水平下春小麦氮磷养分积累动态

Fig. 4 Dynamics of N and P nutrient accumulation in spring wheat under different yield levels

表 4 不同产量水平下春小麦地上部氮素转运及其对籽粒氮素贡献率的特征

Table 4 Characteristics of N transport in aboveground parts and its contribution rate to grain N of spring wheat under different yield levels

处理 Treatment	营养器官氮素积累量 N accumulation in vegetative organs		花前氮素 N before anthesis		花后氮素 N after anthesis	
	开花期 Anthesis stage/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	成熟期 Maturity stage/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	转运量 Translocation amount/(kg·hm <sup>-2</sup> )	贡献率 Contribution rate/%	同化量 Assimilation amount/(kg·hm <sup>-2</sup> )	贡献率 Contribution rate/%
	P0	219.57±2.09c	56.48±3.55c	163.09±1.46c	73.59±1.3c	58.60±4.49a
P1	244.42±6.56b	62.11±1.32b	182.31±5.69b	78.03±1.4b	51.43±5.15a	21.97±1.4b
P2	263.51±16.82ab	68.05±2.68a	195.45±14.22ab	82.30±0.5a	41.97±1.58b	17.70±0.5c
P3	273.04±13.99a	70.55±3.10a	202.49±11.30a	84.35±1.7a	37.52±3.82b	15.65±1.7c
P4	267.78±6.95a	69.04±2.83a	198.74±4.53a	83.71±2.1a	38.73±5.47b	16.29±2.1c

表 5 不同产量水平下春小麦地上部磷素转运及其对籽粒磷素贡献率的特征

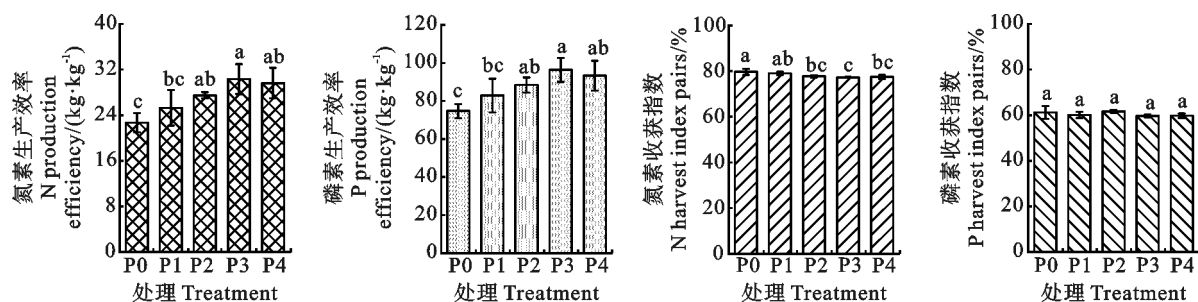
Table 5 Characteristics of P transport in aboveground parts and its contribution rate to grain P of spring wheat under different yield levels

处理 Treatment	营养器官磷素积累量 P accumulation in vegetative organs		花前磷素 P before anthesis		花后磷素 P after anthesis	
	开花期 Anthesis stage/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	成熟期 Maturity stage/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	转运量 Translocation amount/(kg·hm <sup>-2</sup> )	贡献率 Contribution rate/%	同化量 Assimilation amount/(kg·hm <sup>-2</sup> )	贡献率 Contribution rate/%
	P0	66.83±2.41d	32.70±1.63b	34.13±2.49b	66.03±2.0c	17.58±1.88a
P1	72.59±2.38c	35.90±0.96b	36.70±3.06b	67.70±3.4bc	17.45±1.28a	32.30±3.4ab
P2	77.51±3.09b	36.21±2.04b	41.30±1.60a	70.97±2.2ab	16.90±1.46a	29.03±2.2bc
P3	82.01±1.50a	39.39±1.06a	42.62±0.63a	73.19±1.7a	15.63±1.20a	26.81±1.7c
P4	81.70±0.30a	39.16±0.75a	42.54±1.02a	73.14±2.2a	15.64±1.58a	26.86±2.2c

### 2.3.3 不同产量春小麦氮磷营养的特征

高产处理(P3和P4)的春小麦有较高水平的氮素生产效率和磷素生产效率(图5),平均为29.98和

94.80 kg · kg<sup>-1</sup>,较中产处理平均值分别提高19.25%和15.64%。高产处理的春小麦氮素收获指数和磷素收获指数平均分别为59.71%。



图柱上不同字母表示不同处理间在0.05上差异显著。

Different letters above the bars indicate significant differences among different treatments at 0.05 level.

图5 不同产量水平下春小麦氮磷生产效率及氮磷收获指数的差异

Fig. 5 N and P production efficiency and N and P harvest index of spring wheat under different yield levels

## 3 讨论

### 3.1 高产春小麦地上部干物质积累与转运与产量的关系

小麦是磷敏感作物,磷供应不足和过量都会严重影响其生长发育、分蘖数和干物质积累,适量施用磷肥能促进小麦的生长发育,提高产量。小麦产量取决于有效穗数、穗粒数和粒重之间的协调<sup>[13]</sup>。小麦干物质积累是产量形成的基础,干物质积累及其转运特征与产量的提高关系密切<sup>[14]</sup>。拔节一开花期是小麦籽粒形成的关键时期,此时的干物质积累量为后期小麦产量的形成奠定基础<sup>[15]</sup>。Masoni等<sup>[16]</sup>认为,小麦开花期及成熟期干物质积累量越高,籽粒产量越高,而适量施用磷肥通过促进小麦不同生育时期干物质的积累,提高光合产物的同化效率,进而增加产量<sup>[3,8]</sup>。本研究中施磷显著提高拔节后春小麦的干物质积累量,且随着生育期推进,春小麦各生育期营养器官和生殖器官干物质质量均在施磷量为150 kg · hm<sup>-2</sup>条件下达到最高,且开花期干物质积累量和成熟期干物质积累均达到最大,说明春小麦拔节后较多的干物质积累是实现春小麦高产的重要原因。花后光合同化物的积累和花前营养器官贮存的同化产物向籽粒中的转运是小麦籽粒产量的主要来源,因而促进干物质向籽粒的转运是提高小麦产量的有效途径<sup>[8]</sup>。研究表明,施磷90~135 kg · hm<sup>-2</sup>可提高小麦花前干物质转运量和转运效率,促进花前积累物质在花后向籽粒转运<sup>[12]</sup>,且

营养器官花前干物质对籽粒产量的贡献率为29.3%~32.0%时更有利小麦实现高产<sup>[8]</sup>。为实现春小麦高产(>9 000 kg · hm<sup>-2</sup>),本研究发现在施磷150 kg · hm<sup>-2</sup>的条件下,花前干物质转运量、转运效率以及对籽粒产量的贡献率分别达到3.82 t · hm<sup>-2</sup>,23.27%和38.22%,为后期其籽粒生长提供足够碳源,是形成高产的重要特征。

### 3.2 高产春小麦地上部氮磷营养与产量的关系

高产小麦具有较高的地上部氮、磷吸收量和养分收获指数,因为高产小麦能吸收更多的氮、磷,并将吸收的氮、磷养分更多地分配和转移到籽粒中,利用单位数量的氮、磷形成更多的籽粒产量,有较高的养分吸收和利用能力<sup>[2]</sup>。植物生长通常受到氮和磷的共同约束,这种共同约束可能因氮和磷相互作用的程度和方向而异<sup>[17]</sup>。研究表明,磷素的添加可以改变小麦地上部氮素的浓度,但改变的程度远小于磷素<sup>[18]</sup>,进而改变作物对氮磷养分积累量,促进植株对氮磷素的吸收与同化,提高其利用率。有研究结果显示,在施氮150 kg · hm<sup>-2</sup>条件下,增施磷肥可提高开花期和成熟期地上部氮素积累量、营养器官花前贮存氮素转运量及转运效率,进而提高产量<sup>[19]</sup>。本研究中在施磷150和210 kg · hm<sup>-2</sup>的高产处理下春小麦在各个生育阶段都维持有较高的氮磷积累量,且植株中的氮、磷素主要来自花前氮、磷运转量,籽粒中约83%的氮来自花前氮素同化,73%的磷来自花前磷素同化,因此保证一定的花前氮、磷素积累量是春小麦实现高产的基础。陕西杨凌不同

施肥水平的试验发现,当施磷量由  $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  增至  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,小麦籽粒产量由  $4.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  增至  $7.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,氮素生产效率由  $25.05 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  增至  $32.46 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[20]</sup>。本研究中高产处理组的春小麦有较高水平的氮素生产效率和磷素生产效率,平均为  $29.98$  和  $94.80 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。养分收获指数是衡量肥料投入对农作物收获效果的指标,反映农作物对肥料的利用率。大量研究表明,高产小麦籽粒产氮磷收获指数分别维持在  $77\%$  左右<sup>[21]</sup> 和  $80\%$  左右<sup>[22]</sup>。本研究高产处理下春小麦的氮素收获指数平均为  $77.38\%$ ,磷素收获指数平均为  $59.79\%$ 。综合来看,高产春小麦具有较强的养分吸收能力和养分转运能力。

#### 4 结论

在北疆春小麦滴灌种植模式下,施用磷肥可促进滴灌春小麦地上部干物质积累、氮磷积累和转运利用,提高氮磷素生产效率,进而增加产量。在施磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ )  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,产量达到最高值( $9401.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),与中产处理( $\text{P}_0$ 、 $\text{P}_1$ 、 $\text{P}_2$ )相比,增加  $13.52\% \sim 48.98\%$ 。因此在本试验条件下, $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  为本地区滴灌春小麦实现高产的最佳施磷量。

#### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.  
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook. Beijing [M]; China Statistical Publishing House, 2023.
- [2] 刘 翔, 王朝辉, 刁超朋, 等. 旱地不同小麦品种产量与干物质及氮磷钾养分需求的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 600-605.  
LIU L, WANG Z H, DIAO C P, et al. Grain yields of different wheat cultivars and their relations to dry matter and NPK requirements in dryland [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(3): 600-605.
- [3] FONTANA M, BÉLANGER G, HIRTE J, et al. Critical plant phosphorus for winter wheat assessed from long-term field experiments [J]. *European Journal of Agronomy*, 2021, 126: 126263.
- [4] 杨国江, 彭 懿, 尹飞虎, 等. 滴灌磷肥在灰漠土中运移的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 138.  
YANG G J, PENG Y, YIN F H, et al. Phosphorus migration of monoammonium phosphate via drip-irrigation in gray desert soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(6): 138.
- [5] ZHANG W F, MA W Q, JJ Y X, et al. Efficiency, economics, and environmental implications of phosphorus resource use and the fertilizer industry in China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 2008, 80(2): 143.
- [6] LI H, LIU J, LI G, et al. Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses [J]. *Ambio*, 2015, 44(Suppl 2): 274.
- [7] 刘 冲, 贾永红, 张金汕, 等. 施磷量对不同播种方式下冬小麦干物质转运及养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 978.  
LIU C, JIA Y H, ZHANG J S, et al. Effects phosphorus application rates on dry matter translocation and nutrient uptake and utilization of winter wheat under different seeding patterns [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(5): 978.
- [8] 薛华龙, 姜梦玉, 李 雪, 等. 施磷水平对不同茬口下冬小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(17): 3715.  
XUE H L, LOU M Y, LI X, et al. Effects of phosphorus application levels on growth and yield of winter wheat under different crops for rotation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3715.
- [9] HUANG W, WANG Y S, GUO Y P, et al. Effects of phosphate treatment on growth dynamics of wheat in wheat/corn intercropping system in southwest hilly area [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2014, 15(8): 1346.
- [10] 王 飞, 尹 飞, 龙浩强, 等. 玉米 || 花生茬口对冬小麦旗叶光化学活性的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(7): 127.  
WANG F, YIN F, LONG H Q, et al. Photochemical activity in flag leaves of winter wheat when following maize, peanut, or a maize-peanut intercrop in a crop rotation [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(7): 127.
- [11] 王昆昆, 廖世鹏, 任 涛, 等. 连续秸秆还田对油菜水稻轮作土壤磷素有效性及作物磷素利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1): 99.  
WANG K K, LIAO S P, REN T, et al. Effect of continuous straw returning on soil phosphorus availability and crop phosphorus utilization efficiency of oilseed rape-rice rotation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(1): 99.
- [12] 黄玉芳, 张 辉, 张立花, 等. 施磷量对高磷土壤小麦磷素吸收和土壤磷平衡的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(2): 214.  
HUANG Y F, ZHANG H, ZHANG L H, et al. Effect of phosphorus fertilizer rates on wheat P uptake and soil P balance in high-P soil [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(2): 214.
- [13] 向晓玲, 陈松鹤, 杨洪坤, 等. 秸秆覆盖与施磷对丘陵旱地小麦产量和磷素吸收利用效应的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(24): 5202.  
XIANG X L, CHEN S H, YANG H K, et al. Effects of straw mulching and phosphorus application on wheat yield, phosphorus absorption and utilization in hilly dryland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(24): 5202.
- [14] 曹议丹, 钱麟君, 霍俊豪, 等. 优化管理对小麦-玉米轮作系统植株干物质积累、转运与产量的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(5): 67.  
CAO Y D, QIAN L J, HUO J H, et al. Effects of optimized

- management on accumulation and translocation of dry matter and crop yield in wheat-maize rotation system [J]. 2024, 56(5):67.
- [15] 杜宇笑, 李鑫格, 张羽, 等. 不同产量水平下稻茬小麦的氮素营养指标特征[J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26(8):1426.
- DU Y X, LI X G, ZHANG Y, *et al.* Variation in nitrogen status indicators with grain yield level for winter wheat after rice [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(8):1426.
- [16] MASONI A, ERCOLI L, MARIOTTI M, *et al.* Post-anthesis accumulation and remobilization of dry matter, nitrogen and phosphorus in durum wheat as affected by soil type [J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(3):181.
- [17] JIANG J, WANG Y P, YANG Y, *et al.* Interactive effects of nitrogen and phosphorus additions on plant growth vary with ecosystem type [J]. *Plant and Soil*, 2019, 440(1):529.
- [18] BÉLANGER G, ZIADI N, PAGEAU D, *et al.* A model of critical phosphorus concentration in the shoot biomass of wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(3):966.
- [19] 张萌, 高志强, 李光, 等. 免耕覆盖条件下氮磷配施对旱地小麦氮素积累、分配及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(3):366.
- ZHANG M, GAO Z Q, LI G, *et al.* Effects of different nitrogen and phosphorus fertilizer on the nitrogen accumulation and distribution, yield of dryland wheat under No-tillage and film mulching [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(3):366.
- [20] 陈丽. 麦季不同施磷量对小麦玉米轮作产量和氮磷养分利用的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2023.
- CHEN L. Effects of different phosphorus rates in wheat season on yield and nitrogen and phosphorus utilization in wheat-maize rotation system [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
- [21] YUE S C, MENG Q F, ZHAO R F, *et al.* Change in nitrogen requirement with increasing grain yield for winter wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(6):1690.
- [22] ZHAN A, CHEN X, LI S, *et al.* Changes in phosphorus requirement with increasing grain yield for winter wheat [J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(6):2005.