

张旭婷, 张海龙, 张佳倩, 等. 叶面氮肥不同施用量对玉米干物质积累分配与转运的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(1): 9-17.  
ZHANG X T, ZHANG H L, ZHANG J Q, et al. The effect of different application rates of foliar nitrogen fertilizer on the accumulation, distribution, and transport of dry matter in maize[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(1): 9-17.

## 叶面氮肥不同施用量对玉米干物质积累分配与转运的影响

张旭婷<sup>1</sup>, 张海龙<sup>1</sup>, 张佳倩<sup>2</sup>, 刘亚楠<sup>1</sup>, 张德健<sup>2</sup>, 付增娟<sup>1</sup>, 薛春雷<sup>1</sup>, 张赛楠<sup>1</sup>, 孙峰成<sup>1\*</sup>

(1. 内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特 010031, 2. 内蒙古大学 生命科学学院, 呼和浩特 010033)

**摘要:** [目的] 为研究叶面氮肥不同施用处理对玉米干物质积累分配与转运影响的科学问题。[方法] 以利禾1号为研究对象, 设置不施肥处理(CK)、常规根部施肥处理(CF)、叶面减氮20%处理(LF1)、叶面常规施氮处理(LF2)、叶面增氮20%处理(LF3), 采用随机区组设计, 对玉米干物质积累分配与转运进行研究。[结果] 2021年LF1的单株干物质积累量最高, 较CK和CF高出23.04%和1.47%, 2022年同样以LF1的单株干物质积累量最高, 分别较LF2和LF3高出2.19%和9.91%。干物质分配拔节期时以叶为主, 大喇叭口期和抽雄吐丝期以茎为主, 抽雄吐丝期后, 穗、籽粒干物质分配占比逐渐增高, 在成熟期达到最大。[结论] 叶面氮肥不同施用处理的籽粒干物质积累量均显著高于CK, 其中LF1处理的籽粒干物质积累分配占比最高。

**关键词:** 叶面氮肥; 施用量; 玉米; 干物质

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2025)01-0009-09

## The Effect of Different Application Rates of Foliar Nitrogen Fertilizer on the Accumulation, Distribution, and Transport of Dry Matter in Maize

ZHANG Xuting<sup>1</sup>, ZHANG Hailong<sup>1</sup>, ZHANG Jiaqian<sup>2</sup>, LIU Ya'nan<sup>1</sup>, ZHANG Dejian<sup>2</sup>, FU Zengjuan<sup>1</sup>,  
XUE Chunlei<sup>1</sup>, ZHANG Sainan<sup>1</sup>, SUN Fengcheng<sup>1\*</sup>

(1. Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China;

2. College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010033, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the scientific issues of different foliar nitrogen fertilizer application treatments on the accumulation, distribution, and transport of dry matter in maize. [Methods] Lihe 1 was selected as the research object. Non fertilization treatment (CK), conventional root fertilization treatment (CF), foliar nitrogen reduction treatment (LF1), foliar conventional nitrogen application treatment (LF2), and foliar nitrogen increase treatment (LF3) were set up. Random block design was used to study the accumulation, distribution, and transport of dry matter in maize. [Results] In 2021, LF1 had the highest single plant dry matter accumulation, which was 23.04% and 1.47% higher than CK and CF. In 2022, LF1 also had the highest single plant dry matter accumulation, which was 2.19% and 9.91% higher than LF2 and LF3, respectively. During the jointing stage, the distribution of dry matter is mainly dominated by leaves, while during the large bell mouth stage and tasseling and silk emergence stage, it is mainly dominated by stems. After the tasseling and silk emergence stage, the proportion of dry matter distribution in panicles and grains gradually increases, reaching its maximum at maturity. [Conclusion] The dry matter accumulation of grains under different foliar

收稿日期: 2024-06-21 修回日期: 2024-09-28

基金项目: 内蒙古自治区农牧业科技转移转化资金项目(2022TG12); 内蒙古自然科学基金面上项目(2022MS03068); 内蒙古自治区青年创新基金项目(2024QNJJN07)

第一作者: 张旭婷(1992-), 女, 博士, 助理研究员, 从事玉米育种和栽培研究, E-mail: 2278655328@qq.com

通信作者: 孙峰成(1975-), 男, 博士, 研究员, 从事玉米育种和栽培研究, E-mail: 13947132680@139.com

nitrogen fertilizer application treatments was significantly higher than that of CK, with the LF1 treatment having the highest proportion of dry matter accumulation distribution in grains.

**Key words:** foliar nitrogen fertilizer; application rates; maize; dry matter

玉米(*Zea mays* L.)是我国重要的粮食作物、经济作物、能源作物,在保障国家粮食安全、为农民创收、促进国家工业发展等方面有着至关重要的地位<sup>[1]</sup>。氮是作物需求量最大的矿质营养元素,参与细胞生长、分化、和植物体内的各种代谢过程<sup>[2]</sup>,能促进玉米营养吸收,协调玉米根系与茎叶生长<sup>[3-4]</sup>,是作物增产的一项重要栽培措施<sup>[5]</sup>。目前玉米种植过程中多采用土壤施入氮素的单一施肥方式,施入量偏高,肥料成本和人工成本投入较大,氮素利用率不高,经济效益低下、容易造成土壤酸化、盐碱化、水体和大气污染等生态环境问题<sup>[6-9]</sup>。叶面施肥作为不同于根部施肥的一种方式,打破了常规土壤根部施肥方式,可及时补充和强化作物所需养分,逐步被推广应用到生产实践中<sup>[10]</sup>。叶片是植物最重要的根外营养器官,与根一样可以吸收利用养分,叶面肥中的养分先通过气孔或叶角质层的孔隙和亲水小孔,再通过表皮细胞细胞壁到达原生质膜,或通过叶表细胞的质外连丝把营养物质吸收到细胞内部,可以增加肥料利用率,减少土壤污染<sup>[11-12]</sup>。玉米种植上的应用也以氨基酸叶面肥、叶面硅肥、叶面锌肥、植物生长调节剂为主,叶面氮肥的尝试较少<sup>[13]</sup>。因此,探究减少氮肥投入,增加产量的种植施肥方式逐步成为研究应用的热点。

干物质是作物进行光合作用的产物,玉米植株的干物质积累与转运对产量形成十分关键,适宜的施氮量能促进玉米干物质向籽粒转运,增加养分的吸收积累,提高干物质积累能力以及同化物向籽粒的转移能力、协调源库关系,是提高玉米产量的有效途径<sup>[14]</sup>。景立权等<sup>[15]</sup>研究发现,施用氮肥可以促进玉米干物质积累量的增加,其中花后 10 d 内干物质积累量最大,积累速度最快。叶面肥的营养作用能提高植物的叶面积指数,叶绿素含量、植株地上部干物质含量等,促进作物整体的生长发育<sup>[16]</sup>。李灿东等<sup>[17]</sup>研究发现,不同时期施氮对干物质的积累分配也存在差异,因此合理地施用氮肥至关重要。

本研究为解决玉米传统种植过程中根部过量施肥,阐明叶面氮肥不同施用水平对玉米干物质积累分配与转运的影响,设置 5 个不同处理,采用随机区组设计,以不施肥处理和常规根部施肥处理作对照,研究叶面氮肥不同施用水平下玉米干物质积累与转运的机制,为内蒙古农牧交错区玉米栽培提供理论依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验在内蒙古农牧业科学院内试验田进行,试验区属于中温带大陆性季风气候,四季气候特征分明,年平均降雨量 350~450 mm,年蒸发量 1 400~1 600 mm,常年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温 1 400  $^{\circ}\text{C}$ 。土壤类型为黄壤土,试验地 0~20 cm 土层养分为:有机质含量 17.53  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮含量 0.83  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全磷含量 0.53  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全钾含量 17.90  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,碱解氮含量 53.21  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷含量 25.70  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量 113.60  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤平均容重 1.33  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

### 1.2 试验材料

本试验以国审玉米品种利禾 1 号为研究对象,由内蒙古利禾农业科技发展有限公司育出。试验肥料尿素,中煤集团生产,总氮含量 $\geq 46.4\%$ ;禾美纳液体缓释氮肥,山东佳格农业生物科技有限公司生产,总氮含量 $\geq 340\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

### 1.3 试验设计

2021-2022 年进行 2 年试验,采用随机区组设计,共设置 5 个处理,CK 处理不施肥,除 CK 处理外,其他处理均施入等量复合肥作为底肥,在玉米 9 叶期采用不同方式进行追肥,CF 处理采用常规根部施肥的方式施入,施肥量为 300  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,叶面减氮 20% 处理(LF1)、叶面常规施氮处理(LF2)、叶面增氮 20% 处理(LF3),LF1、LF2、LF3 处理分别以 6, 7.5, 9  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的梯度进行叶面喷施。喷施时选择晴天早晨或傍晚将叶面肥兑水均匀喷施在玉米叶面上,以湿润但不滴水为宜。每个处理设置 3 个重复,共计 15 个小区,每小区长 14.0 m、宽 5.5 m、面积 75.6  $\text{m}^2$ 、行距 0.5 m、株距 26.7 cm、四周设保护行各 4 m。种植密度为 75 000 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ ,人工点播,每穴 2 粒,同天播种,其余管理同大田。

### 1.4 干物质相关指标计算

于玉米拔节期(V6)、大喇叭口期(V12)、抽雄吐丝期(VT)、灌浆期(R3)、成熟期(R6)将采集的玉米植株置于烘箱内用 105 °C 杀青 30 min 后 80 °C 烘干至恒重,用电子天平称量测定茎、叶、穗(籽粒、苞叶、穗轴)的干物质重量。

花前营养器官贮藏同化物的转运量(g)=VT 营养器官干重-R6 营养器官干重;花前营养器官贮藏同化物的转运率(%)=(VT 营养器官干重-R6 营养器官干重)/VT 营养器官干重×100;营养器官贮藏同化物对籽粒产量的贡献率(%)=花前营养器官贮藏同化物的转运量/R6 籽粒干重×100。

### 1.5 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行数据统计、整理、分析;采用 SPSS 23 进行统计分析、显著性分析;采用 SigmaPlot 12.5 和 Graphpad prism 5 进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶面氮肥不同施用处理对玉米茎干物质积累量动态的影响

由图 1 可知,茎干物质随着生育期进行整体呈现出先增加后降低,于抽雄吐丝期(VT)达到峰值的单峰变化趋势。由表 1 可知,拔节期(V6)时,2021 年和 2022 年均均为 CK 的茎干物质积累量最低,分别为 8.07 g·株<sup>-1</sup>和 4.07 g·株<sup>-1</sup>,2021 年各处理间茎干物质积累量无显著差异,2022 年各施氮处理茎干物质积累量均显著高于 CK ( $P<0.05$ )。大喇叭口期(V12)时,2021 年和 2022 年均均为 CF 的茎干物质积累量最高,CK 的茎干物质积累量最低,2021 年 CF 显著高于 CK 和 LF3( $P<0.05$ ),与 LF1 和 LF2 无显著差异;2022 年各处理间茎干物质积累量无显著差异。抽雄吐丝期(VT)时,各处理的茎干物质积累量达到最大值,2021 年 LF2 的茎干物质积累量最高,为 100.80 g·株<sup>-1</sup>,茎干物质积累量显著高于 CK ( $P<0.05$ ),各施氮处理间的干物质积累量无显著差异。2022 年 CF 的干物质积累量最高,为 109.60 g·株<sup>-1</sup>,LF3 次之,CF 显著高于 CK、LF1 和 LF2 ( $P<0.05$ ),与 LF3 之间无显著差异。灌浆期(R3)时,各处理的茎干物质积累量相较于抽雄吐丝期(VT)有所下降,2021 年及 2022 年均均为 CF 的茎干物质积累量最高,CK 的茎干物质积累量最低,2021 年各处理间茎干物质积累量无显著差异,2022 年 CF 显著高于 CK、LF1 和 LF2,与 LF3 之间无显著差异。成熟期(R6)时,2021 年 LF2 的茎干物质积累量最高,为 88.08 g·株<sup>-1</sup>,较 CK 提高 23%,显著高于 CK ( $P<0.05$ );2022 年 CK 的茎干物质积累量最低,为 76.85 g·株<sup>-1</sup>,除 CK 外各处理间无显著性差异 ( $P>0.05$ )。

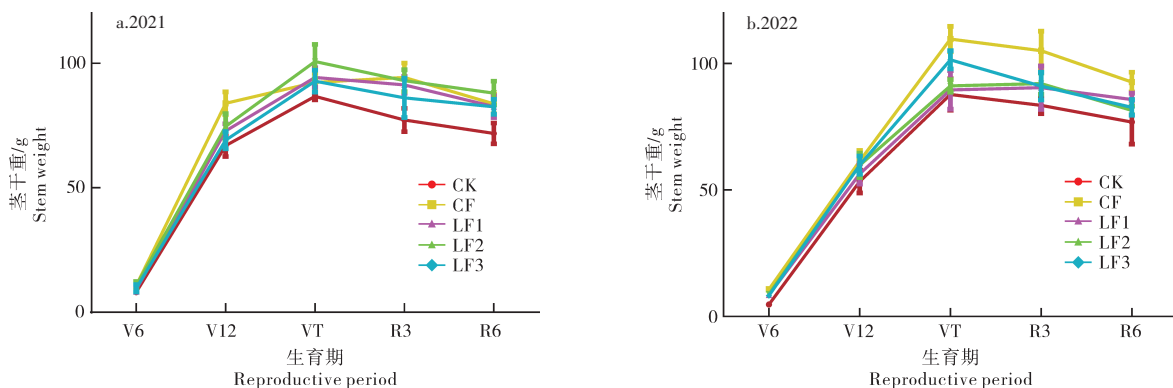


图 1 不同施氮处理对玉米茎干重的影响

Figure 1 Effects of different nitrogen treatments on stem dry weight of maize

### 2.2 叶面氮肥不同施用处理对玉米叶干物质积累量动态的影响

由图 2 可知,2021 年由于遭受极端恶劣冰雹天气,玉米叶片受损严重,从拔节期(V6)到大喇叭口期(V12)直线上升,大喇叭口期(V12)到抽雄吐丝期(VT)下降,后又缓慢上升到灌浆期(R3),最后成熟期(R6)下降的“M”形变化趋势。2022 年随生育期进行呈现出先增加后下降的单峰变化趋势,各处理叶干物质积累量在抽雄吐丝期(VT)达到最大值。

由表 2 可知,拔节期(V6)时,2021 年和 2022 年均均为 CK 的叶干物质积累量最低,分别为 13.08 g·株<sup>-1</sup>和 9.35

表1 不同施氮处理对茎干物质积累量影响的显著性分析

Table 1 The significance analysis of the effect of different nitrogen treatments on stem dry matter accumulation

年份 Year	处理 Treatment	V6	V12	VT	R3	R6
2021	CK	8.07 <sup>a</sup>	66.97 <sup>b</sup>	86.71 <sup>b</sup>	77.20 <sup>a</sup>	71.89 <sup>b</sup>
	CF	10.78 <sup>a</sup>	83.96 <sup>a</sup>	92.35 <sup>ab</sup>	94.37 <sup>a</sup>	83.73 <sup>ab</sup>
	LF1	9.15 <sup>a</sup>	72.87 <sup>ab</sup>	94.37 <sup>ab</sup>	91.37 <sup>a</sup>	82.67 <sup>ab</sup>
	LF2	10.71 <sup>a</sup>	74.66 <sup>ab</sup>	100.80 <sup>a</sup>	93.09 <sup>a</sup>	88.08 <sup>a</sup>
	LF3	9.63 <sup>a</sup>	69.10 <sup>b</sup>	92.88 <sup>ab</sup>	86.19 <sup>a</sup>	82.57 <sup>ab</sup>
2022	CK	4.78 <sup>b</sup>	53.31 <sup>a</sup>	87.73 <sup>b</sup>	83.50 <sup>b</sup>	76.85 <sup>b</sup>
	CF	10.80 <sup>a</sup>	61.47 <sup>a</sup>	109.60 <sup>a</sup>	105.08 <sup>a</sup>	92.65 <sup>a</sup>
	LF1	8.51 <sup>a</sup>	56.38 <sup>a</sup>	89.59 <sup>b</sup>	90.46 <sup>b</sup>	85.74 <sup>ab</sup>
	LF2	8.88 <sup>a</sup>	59.73 <sup>a</sup>	91.16 <sup>b</sup>	92.02 <sup>b</sup>	81.45 <sup>ab</sup>
	LF3	8.25 <sup>a</sup>	59.89 <sup>a</sup>	101.44 <sup>ab</sup>	91.03 <sup>ab</sup>	82.62 <sup>ab</sup>

注:同一列不同小写字母表示各施氮处理在  $P < 0.05$  水平下存在差异。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate that there are differences among nitrogen fertilization treatments at the  $P < 0.05$  level. The same below.

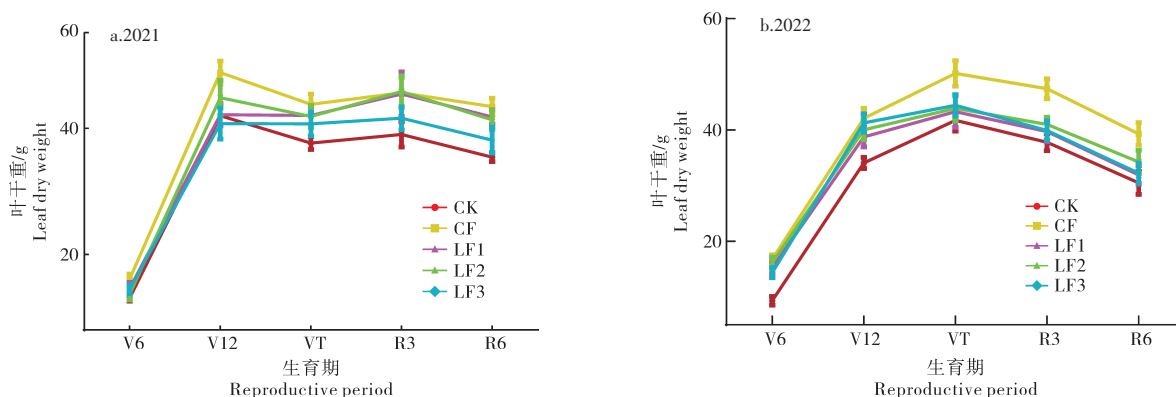


图2 不同施氮处理对玉米叶干重的影响

Figure 2 Effects of different nitrogen treatments on dry weight of maize leaves

$g \cdot \text{株}^{-1}$ , 2022年各施氮处理叶干物质积累量均显著高于CK处理 ( $P < 0.05$ ), 各施氮处理间无显著性差异。大喇叭口期(V12)时, 2021年CF的叶干物质积累量最大, 为  $48.87 g \cdot \text{株}^{-1}$ , 其次是LF2, CF和LF2间无显著差异; 2022年CF、LF2、LF3叶干物质积累量显著高于CK ( $P < 0.05$ )。抽雄吐丝期(VT)时, 2021年和2022年各处理叶干物质积累量的范围分别为  $37.66 \sim 43.8 g \cdot \text{株}^{-1}$  和  $41.72 \sim 50.17 g \cdot \text{株}^{-1}$ , CF的叶干物质积累量最高, 2021年叶干物质积累量整体低于2022年叶干物质积累量, 这是由于2021年叶片受冰雹天气严重影响的原因, 各施氮处理间无显著性差异。灌浆期(R3)时, 2021年LF2的叶干物质积累量最高, 为  $45.86 g \cdot \text{株}^{-1}$ , 2022年CF的叶干物质积累量显著高于其他处理, 各处理的叶干物质积累量大小顺序为  $CF > LF2 > LF3 > LF1 > CK$ 。成熟期(R6)时, 2021年CF、

表2 不同施氮处理玉米叶干物质积累量的显著性分析

Table 2 Significance analysis of dry matter accumulation in maize leaves under different nitrogen treatments

年份 Year	处理 Treatment	V6	V12	VT	R3	R6
2021	CK	13.08 <sup>b</sup>	42.01 <sup>b</sup>	37.66 <sup>b</sup>	39.04 <sup>a</sup>	35.42 <sup>c</sup>
	CF	16.09 <sup>a</sup>	48.87 <sup>a</sup>	43.8 <sup>a</sup>	45.68 <sup>a</sup>	43.46 <sup>a</sup>
	LF1	14.58 <sup>ab</sup>	42.18 <sup>b</sup>	42.07 <sup>ab</sup>	45.48 <sup>a</sup>	41.81 <sup>ab</sup>
	LF2	13.71 <sup>ab</sup>	44.87 <sup>ab</sup>	41.89 <sup>ab</sup>	45.86 <sup>a</sup>	41.37 <sup>ab</sup>
	LF3	14.44 <sup>ab</sup>	40.77 <sup>b</sup>	40.72 <sup>ab</sup>	41.64 <sup>a</sup>	38.14 <sup>bc</sup>
2022	CK	9.35 <sup>b</sup>	34.10 <sup>b</sup>	41.72 <sup>b</sup>	37.80 <sup>b</sup>	30.49 <sup>b</sup>
	CF	16.78 <sup>a</sup>	42.12 <sup>a</sup>	50.17 <sup>a</sup>	47.41 <sup>a</sup>	39.33 <sup>a</sup>
	LF1	15.23 <sup>a</sup>	38.76 <sup>ab</sup>	43.31 <sup>ab</sup>	39.73 <sup>b</sup>	31.93 <sup>b</sup>
	LF2	16.15 <sup>a</sup>	40.03 <sup>a</sup>	43.91 <sup>ab</sup>	41.21 <sup>b</sup>	34.27 <sup>ab</sup>
	LF3	14.38 <sup>a</sup>	41.27 <sup>a</sup>	44.46 <sup>ab</sup>	39.91 <sup>b</sup>	32.27 <sup>b</sup>

LF1、LF2 显著高于 CK, 2022 年 CF 显著高于 CK、LF1、LF3 ( $P < 0.05$ ), CF 与 LF2 间无显著性差异。2021 年和 2022 年各生育期干物质积累量最大的处理分布在 CF、LF2 之间。

### 2.3 叶面氮肥不同施用处理对玉米单株干物质积累量动态的影响

由图 3 可知, 整体呈逐渐上升的趋势, 并在成熟期达到最大值。由表 3 可知, 拔节期 (V6) 时, 2021 年和 2022 年 CK 的单株干物质积累量最低, 分别为  $21.16 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  和  $14 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ , 2021 年各处理间无显著性差异, 2022 年各施氮处理单株干物质积累量显著高于 CK。大喇叭口期 (V12) 时, 2021 年和 2022 年均为 CK 的单株干物质积累量最低, 分别为  $108.98 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$  和  $85.18 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ , 2021 年 CF 显著高于 CK 和 LF3 ( $P < 0.05$ ), CF、LF1 和 LF2 间无显著差异; 2022 年除 CK 外, 各施氮处理间无显著性差异。抽雄吐丝期 (VT) 时, 2021 年 CK 的单株干物质积累量最低, 为  $145.67 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ , 2022 年 CF、LF2 和 LF3 显著高于 CK。灌浆期 (R3) 时, CF、LF1 和 LF2 显著高于 CK ( $P < 0.05$ ), 2022 年各施氮处理的单株干物质积累量均显著大于 CK ( $P < 0.05$ )。成熟期 (R6) 时, 2021 年 LF1 的单株干物质积累量最大, 为  $415.89 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$ , CF、LF1 和 LF2 显著高于 CK 和 LF3 ( $P < 0.05$ ), 各处理间的单株干物质大小顺序为  $\text{LF1} > \text{CF} > \text{LF2} > \text{LF3} > \text{CK}$ ; 2022 年 CF 和 LF1 显著高于 CK 和 LF3 ( $P < 0.05$ ), CF 与 LF1 间无显著性差异。

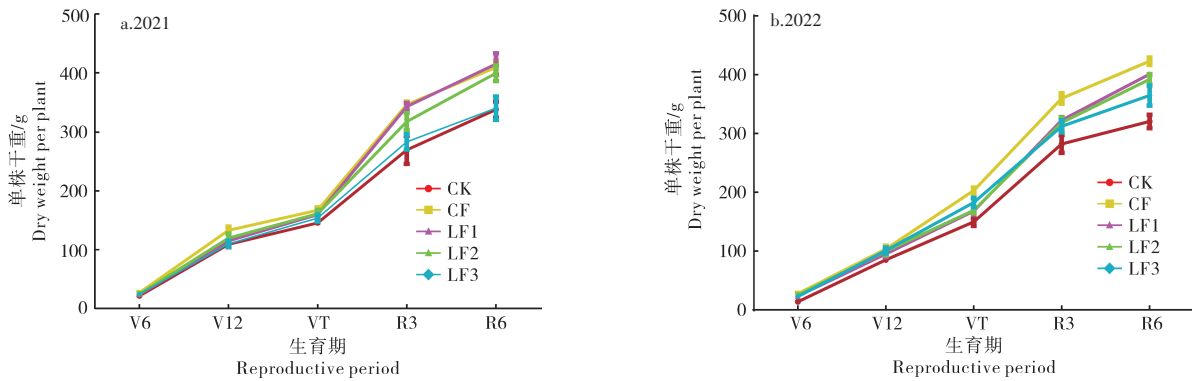


图3 不同施氮处理对玉米单株干重的影响

Figure 3 Effects of different nitrogen treatments on dry weight per plant of maize

表3 不同施氮处理对单株干物质积累量的显著性分析

Table 3 The significance analysis of different nitrogen treatments on dry matter accumulation per plant

年份 Year	处理 Treatment	V6	V12	VT	R3	R6
2021	CK	21.16 <sup>a</sup>	108.98 <sup>b</sup>	145.67 <sup>b</sup>	269.60 <sup>c</sup>	338.02 <sup>b</sup>
	CF	26.87 <sup>a</sup>	132.83 <sup>a</sup>	167.15 <sup>a</sup>	346.81 <sup>a</sup>	409.85 <sup>a</sup>
	LF1	23.73 <sup>a</sup>	115.05 <sup>ab</sup>	159.49 <sup>ab</sup>	343.33 <sup>a</sup>	415.89 <sup>a</sup>
	LF2	24.42 <sup>a</sup>	119.53 <sup>ab</sup>	161.19 <sup>ab</sup>	318.00 <sup>ab</sup>	399.96 <sup>a</sup>
	LF3	24.08 <sup>a</sup>	109.87 <sup>b</sup>	153.90 <sup>ab</sup>	283.55 <sup>bc</sup>	340.50 <sup>b</sup>
2022	CK	14.12 <sup>b</sup>	85.18 <sup>b</sup>	149.98 <sup>c</sup>	282.36 <sup>c</sup>	320.78 <sup>c</sup>
	CF	27.58 <sup>a</sup>	103.60 <sup>a</sup>	203.28 <sup>a</sup>	359.78 <sup>a</sup>	423.32 <sup>a</sup>
	LF1	23.74 <sup>a</sup>	95.14 <sup>ab</sup>	168.10 <sup>bc</sup>	322.85 <sup>b</sup>	401.07 <sup>a</sup>
	LF2	25.03 <sup>a</sup>	99.76 <sup>ab</sup>	169.26 <sup>b</sup>	318.66 <sup>b</sup>	392.49 <sup>ab</sup>
	LF3	22.64 <sup>a</sup>	101.16 <sup>ab</sup>	182.55 <sup>b</sup>	312.13 <sup>b</sup>	364.92 <sup>b</sup>

综合分析, 2021 年和 2022 年均是叶面施氮 LF1 的单株干物质积累量最高, 干物质积累量随施氮水平的提高呈先增加后下降的趋势, 各处理的单株干物质积累量均显著高于 CK, 表明施氮可以增加玉米的单株干物质积累量, LF1 和 LF2 氮肥投入量较少, 维持了较高的干物质积累量, 与 CF 无显著性差异。

### 2.4 叶面氮肥不同施用处理对玉米各器官干物质分配规律的影响

由图 4 可知, 拔节期 (V6) 时, 干物质积累量分配以叶为主, 其次为茎, 2021 年各处理叶和茎干物质积累量分配占比范围为 57%~62% 和 38%~42%; 其次为茎, 2022 年各处理叶和茎干物质积累量分配占比范围为 61%~66% 和 34%~39%。从拔节期 (V6) 到大喇叭口期 (V12), 干物质积累量分配由叶逐渐转移到茎, 2021 年茎的干物质积累量分配比例由 38%~42% 增加到 61%~63%, 叶的干物质积累量分配比例由 57%~62% 减少到 37%~

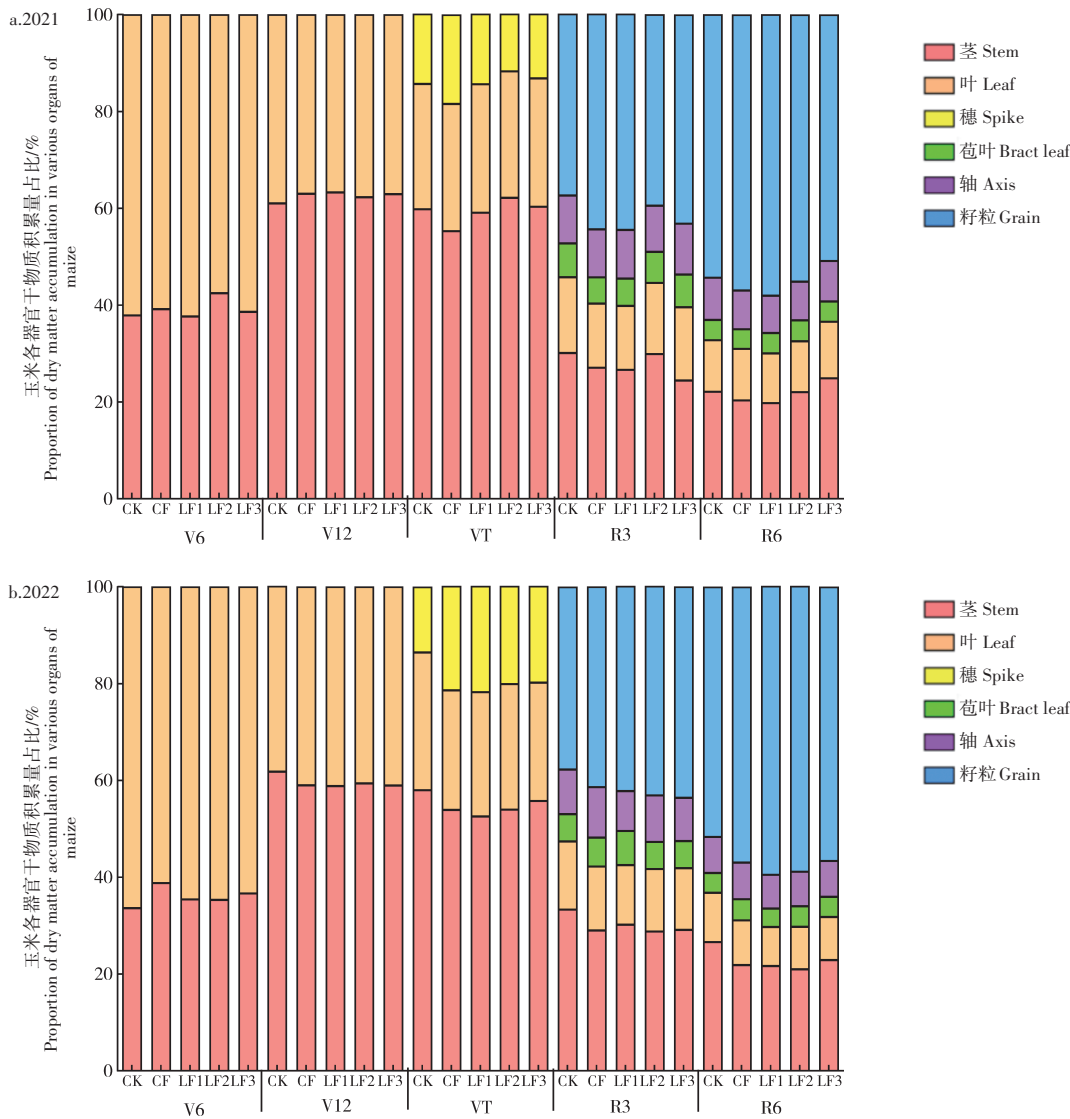


图4 不同施氮处理对玉米各器官干物质分配占比的影响

Figure 4 The effect of different nitrogen treatments on the proportion of dry matter distribution in each organ of maize

39%;2022年茎的干物质积累量分配比例由34%~39%增加到59%~62%,叶的干物质积累量分配比例由61%~66%减少到39%~41%。抽雄吐丝期(VT)时,2021年各处理茎干物质积累量占比范围为55%~62%,其中LF2分配占比最高,显著高于CF( $P<0.05$ ),CF中穗干物质积累量占比最高为18%,显著高于LF2和LF3( $P<0.05$ ),与LF1无显著性差异;2022年茎、叶、穗干物质积累分配占比分别为53%~58%、24%~28%、13%~22%,CF和LF1穗干物质分配占比显著高于CK( $P<0.05$ ),各叶面肥施氮处理间穗干物质分配占比无显著差异。灌浆期(R3)时,2021年茎、叶、苞叶、粒干物质积累量分配占比分别为27%~31%、13%~16%、5%~7%、37%~44%,其中,LF3的茎干物质积累量占比最高为31%,CK的叶干物质积累量分配占比最高为16%,CF的苞叶干物质积累量分配占比最低为5%,显著低于CK( $P<0.05$ ),各施氮处理间苞叶干物质积累量分配占比无显著差异,CF和LF1的籽粒干物质积累量分配占比最高,均为44%;2022年茎、叶、苞叶、轴、粒干物质积累量分配占比分别为29%~33%、12%~14%、6%~7%、8%~10%、38%~43%,LF1的叶干物质积累量分配比例最低为12%,显著低于CK( $P<0.05$ ),CF的轴干物质积累量占比最高为10%,显著高于LF1( $P<0.05$ ),LF3的粒干物质积累量分配占比最高为44%,各施氮处理的粒干物质积累量分配占比显著高于CK( $P<0.05$ ),各处理的粒干物质积累量分配占比大小顺序为LF3>LF2>LF1>CF>CK。成熟期(R6)时,2021年茎、叶、粒干物质积累量分配占比分别为20%~25%、10%~12%、51%~58%,LF3的茎干物质积累量分配占比最高为25%,显著高于CF和LF1( $P<0.05$ );CK和LF3轴干物质积累

量分配占比显著高于LF1( $P<0.05$ ),CF和LF1粒干物质积累分配比例显著高于LF3( $P<0.05$ ),各处理间粒干物质积累分配比例大小顺序为LF1>CF>LF2>CK>LF3;2022年茎、叶、粒干物质积累量分配占比分别为21%~27%、8%~10%、52%~59%,CK的茎干物质积累分配比例最高为27%,显著高于其他处理( $P<0.05$ ),除CK外其他处理间无显著性差异,LF1的叶干物质积累分配比例最低为8%,显著低于CK( $P<0.05$ ),LF1和LF2的粒干物质积累量最高为59%,各施氮处理粒干物质积累分配比例显著高于CK( $P<0.05$ )。

综合分析,拔节期(V6)时干物质分配以叶为主,大喇叭口期(V12)和抽雄吐丝期(VT)干物质分配以茎为主,抽雄吐丝期(VT)后,穗、籽粒干物质分配占比逐渐增高,在成熟期(R6)达到最大。成熟期时,2021年叶面施氮处理中LF1的籽粒干物质积累量分配占比最高,显著高于CK;2022年LF1和LF2的籽粒干物质积累量最高,各施氮处理籽粒干物质积累量均显著高于CK( $P<0.05$ )。

## 2.5 叶面氮肥不同施用处理对玉米干物质转运的影响

由表4可知,2021年LF2的转运量最高,为17.53 g,较CK、CF、LF1、LF3高出3%、96%、47%、36%,CK的转运率和贡献率最高,分别为13.76%和8.90%,各处理的转运率和贡献率大小顺序为CK>LF2>LF3>LF1>CF。2022年LF3的转运量、转运率、贡献率均最高,分别为31.01 g、20.82%、15.94%,转运量是CK、CF、LF1、LF2的1.32倍、1.12倍、2.04倍、1.60倍;转运率是CK、CF、LF1、LF2的1.20倍、1.20倍、1.96倍、1.46倍;贡献率是CK、CF、LF1、LF2的1.17倍、1.38倍、2.24倍、1.71倍。

表4 不同施氮处理对干物质转运的影响

Table 4 Effects of different nitrogen treatments on dry matter transport

年份 Year	处理 Treatment	转运量 Transshipment	转运率/% Transfer rate	贡献率/% Contribution rate
2021	CK	17.06 <sup>a</sup>	13.76 <sup>a</sup>	8.90 <sup>a</sup>
	CF	8.96 <sup>c</sup>	6.53 <sup>d</sup>	3.90 <sup>b</sup>
	LF1	11.95 <sup>b</sup>	8.66 <sup>c</sup>	5.42 <sup>b</sup>
	LF2	17.53 <sup>a</sup>	11.13 <sup>d</sup>	8.87 <sup>a</sup>
	LF3	12.90 <sup>b</sup>	9.64 <sup>c</sup>	8.07 <sup>a</sup>
2022	CK	23.58 <sup>c</sup>	17.31 <sup>ab</sup>	13.58 <sup>b</sup>
	CF	27.80 <sup>b</sup>	17.36 <sup>ab</sup>	11.57 <sup>c</sup>
	LF1	15.23 <sup>c</sup>	10.64 <sup>c</sup>	7.13 <sup>c</sup>
	LF2	19.36 <sup>d</sup>	14.24 <sup>b</sup>	9.34 <sup>d</sup>
	LF3	31.01 <sup>a</sup>	20.82 <sup>a</sup>	15.94 <sup>a</sup>

## 3 讨论与结论

前人研究表明玉米植株干物质积累与转运对其产量形成有重要作用,发现提高干物质积累能力以及同化物向籽粒的转移能力、协调源库关系是提高玉米产量的有效途径<sup>[14]</sup>。本研究通过对玉米植株茎、叶、单株干物质积累量、玉米各器官干物质分配占比研究表明,玉米植株的茎、叶干物质积累量在拔节期、大喇叭口期随生育期的推进而逐渐增加,在抽雄吐丝期达到最大值,而后逐渐下降。单株干物质积累量随生育期的推进逐渐上升,在成熟期达到最大值,呈“S”形变化趋势,这与韩金铃等<sup>[18]</sup>玉米各器官干物质积累量呈单峰曲线动态的研究结果一致。干物质积累量随着施氮水平的提高呈现先增加后下降的趋势<sup>[19]</sup>。本研究表明,2021年LF1的单株干物质积累量最高,较CK和常规根部施肥CF高出23.04%和1.47%,较叶面施肥LF2、LF3高出3.98%和22.14%,2022年叶面施氮处理中以LF1的单株干物质积累量最高,分别较LF2、LF3高出2.19%和9.91%,干物质积累量随施氮水平的提高呈先增加后下降的趋势,各处理的单株干物质积累量均显著高于CK,表明施氮可以增加玉米的单株干物质积累量。干物质积累量与产量呈正相关,在营养生长期主要积累茎秆和叶片的干物质,而到了繁殖生长期主要积累的是果穗的干物质,同时伴随着营养器官的干物质向果穗干物质转运的现象,导致花后阶段积累的干物质总量远大于花前阶段积累的干物质总量<sup>[20]</sup>。本研究表明,拔节期(V6)时干物质分配以叶为主,大喇叭口期(V12)和抽雄吐丝期(VT)干物质分配以茎为主,抽雄吐丝期(VT)后,穗、籽粒干物质分配占比逐渐增高,在成熟期(R6)达到最大。成熟期时,2021年叶面施氮处理中LF1的籽粒干物质积累量分配占比最高,显著高于CK;2022年LF1和LF2的籽粒干物质积累量最高,各施氮处理籽粒干物质积累量均显著

高于CK( $P < 0.05$ )。养分的吸收、同化与转运直接影响着作物的生长和发育<sup>[21]</sup>。王旭敏等<sup>[22]</sup>研究表明适当节水减氮可以显著提高花前干物质转运量。营养器官干物质的积累和转运被认为是产量形成的重要因素。本研究表明 2021 年 LF2 的转运量最高,CK 的转运率和贡献率最高,这是因为 CK 不施氮肥,从土壤汲取的氮素不足以保证籽粒的正常生长,因此需要从营养器官中大量转运,但是过高的转运率和贡献率导致后期植株早衰<sup>[23]</sup>,不利于光合作用的进行,这也是 CK 产量低的原因。2022 年 LF3 的转运量、转运率、贡献率均最高,且干物质积累量显著高于 CK,这是由于 LF3 施肥量较高,能满足籽粒对氮素的需求,在前期植株正常生长营养供给的同时形成良好的库-源结合关系保证后期氮素的持续供应,这与张丽娟等<sup>[24]</sup>的研究一致。

综上通过 2021 年和 2022 年两年试验研究叶面氮肥不同施用量对玉米干物质积累分配与转运的影响,发现 LF1 的单株干物质积累量最高;拔节期时干物质分配以叶为主,大喇叭口期和抽雄吐丝期干物质分配以茎为主,抽雄吐丝期后,穗、籽粒干物质分配占比逐渐增高,在成熟期达到最大;叶面氮肥不同施用处理的籽粒干物质积累量均显著高于 CK,其中 LF1 的籽粒干物质积累分配占比最高。适当减少施用叶面肥可以提高玉米干物质积累量,有利于减少氮肥投入,增加玉米产量。

### 参考文献:

- [1] 韩长赋. 玉米论略[J]. 种子科技, 2012, 30(7): 1-3.  
HAN C F. A brief discussion on corn[J]. Seed Science & Technology, 2012, 30(7): 1-3.
- [2] 李永旗. 叶施尿素对棉花氮素吸收利用分配及生理生化特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.  
LI Y Q. The effect of foliar urea application on nitrogen absorption, utilization, distribution, and physiological and biochemical characteristics of cotton[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [3] 姜佰文, 于士源, 杨贺淇, 等. 增密种植条件下苗期深松与氮肥侧深施对玉米根系生长与氮效率的影响[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(6): 1-9, 19.  
JIANG B W, YU S Y, YANG H Q, et al. Effects of deep loosening and N side-deep fertilization during seedling stage on root growth of field-grown maize under high planting density[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(6): 1-9, 19.
- [4] 杭慧娴, 陈 硕, 杨梦圆, 等. 不同特肥配施在促进玉米生长中的效应研究[J]. 南京农业大学学报, 2024, 47(5): 880-890.  
HANG H X, CHEN S, YANG M Y, et al. Study on the effects of different special fertilizers used in combination to increase the growth of maize[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(5): 880-890.
- [5] CUI Z L, ZHANG F S, MI G H, et al. Interaction between genotypic difference and nitrogen management strategy in determining nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Plant and Soil, 2009, 317(1): 267-276.
- [6] MU X H, CHEN F J, WU Q P, et al. Genetic improvement of root growth increases maize yield via enhanced post-silking nitrogen uptake[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 63: 55-61.
- [7] DING W C, XU X P, HE P, et al. Estimating regional N application rates for rice in China based on target yield, indigenous N supply, and N loss[J]. Environmental Pollution, 2020, 263: 114408.
- [8] 房娜娜, 李 敏, 段文龙, 等. 不同脲甲醛肥料与尿素配施对夏玉米生长及土壤氮素的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(7): 166-169.  
FANG N N, LI M, DUAN W L, et al. Effects of combined application of urea and urea-formaldehyde fertilizers on summer maize growth and soil nitrogen[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(7): 166-169.
- [9] 张文辉, 丁巍巍, 张 勇, 等. 脲甲醛缓释肥料的研究进展[J]. 化工进展, 2011, 30(增刊 1): 437-441.  
ZHANG W H, DING W W, ZHANG Y, et al. Research progress on urea formaldehyde slow-release fertilizer[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(S1): 437-441.
- [10] FAGERIA N K, BARBOSA FILHO M P, MOREIRA A, et al. Foliar fertilization of crop plants[J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 32(6): 1044-1064.
- [11] FRANKE W. Mechanisms of foliar penetration of solutions[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1967, 18: 281-300.
- [12] EICHERT T, GOLDBACH H E. Equivalent pore radii of hydrophilic foliar uptake routes in stomatous and astomatous leaf surfaces—further evidence for a stomatal pathway[J]. Physiologia Plantarum, 2008, 132(4): 491-502.
- [13] 张志辉. 氨基酸叶面肥处理对玉米开花期高温胁迫的调控效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.  
ZHANG Z H. Study on the regulatory effect of amino acid foliar fertilizer treatment on high temperature stress during maize flowering period[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018.

- [14] DORDAS C. Variation in dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in barley as affected by fertilization, cultivar, and source-sink relations[J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 37(1): 31-42.
- [15] 景立权, 赵福成, 刘 萍, 等. 施氮对超高产夏玉米干物质及光合特性的影响[J]. *核农学报*, 2014, 28(2): 317-326.  
JING L Q, ZHAO F C, LIU P, et al. Effects of nitrogen treatments on dry matter production and photosynthetic characteristics of summer maize (*Zea mays* L.) under super-high yield conditions[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(2): 317-326.
- [16] 程爱梅. 叶面肥对提高玉米产量的影响与调控机理研究[J]. *农业科技与信息*, 2020(18): 42-44.  
CHENG A M. Research on the effect and regulation mechanism of foliar fertilizer on increasing corn yield[J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2020(18): 42-44.
- [17] 李灿东, 郭 泰, 王志新, 等. 叶面施氮对大豆“合丰50”叶片叶绿素含量及干物质积累的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(5): 43-46.  
LI C D, GUO T, WANG Z X, et al. The effect of foliar nitrogen application on chlorophyll content and dry matter accumulation in soybean "Hefeng 50" leaves[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(5): 43-46.
- [18] 韩金玲, 李彦生, 杨 晴, 等. 不同种植密度下春玉米干物质积累、分配和转移规律研究[J]. *玉米科学*, 2008, 16(5): 115-118.  
HAN J L, LI Y S, YANG Q, et al. Research on the accumulation, distribution, and transfer of dry matter in spring corn under different planting density[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(5): 115-118.
- [19] 高肖贤, 张华芳, 马文奇, 等. 不同施氮量对夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. *玉米科学*, 2014, 22(1): 121-126, 131.  
GAO X X, ZHANG H F, MA W Q, et al. The effect of different nitrogen application rates on summer maize yield and nitrogen utilization[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(1): 121-126, 131.
- [20] 宋振伟, 齐 华, 张振平, 等. 春玉米中单909农艺性状和产量对密植的响应及其在东北不同区域的差异[J]. *作物学报*, 2012, 38(12): 2267-2277.  
SONG Z W, QI H, ZHANG Z P, et al. The response of agronomic traits and yield of spring maize Zhongdan 909 to close planting and its differences in different regions of Northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(12): 2267-2277.
- [21] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(1): 71-76.  
SONG H X, LI S X. Dynamic changes in maize growth, nutrient uptake, and nitrogen fertilizer utilization efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(1): 71-76.
- [22] 王旭敏. 减氮节水对关中原夏玉米产量和水氮利用效率的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.  
WANG X M. Effects of water saving and nitrogen reduction on summer maize yield and water and nitrogen use efficiency in Guanzhong Plain[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [23] 李秧秧, 刘文兆. 土壤水分与氮肥对玉米根系生长的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(1): 13-15.  
LI Y Y, LIU W Z. The effects of soil moisture and nitrogen fertilizer on maize root growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(1): 13-15.
- [24] 张丽娟, 李莹莹, 杨恒山, 等. 不同氮肥处理对春玉米干物质积累和转运的影响[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(6): 490-493.  
ZHANG L J, LI Y Y, YANG H S, et al. The effects of different nitrogen fertilizer treatments on dry matter accumulation and transport in spring maize[J]. *Journal of Inner Mongolia Minzu University(Natural Science Edition)*, 2017, 32(6): 490-493.