

# 松嫩平原西部膜下滴灌玉米基于叶龄指数的 适宜追氮量研究

刘慧迪, 杨克军\*, 李佐同, 王玉凤, 张翼飞, 王智慧, 付健,  
谷英楠, 杨系玲, 吴琼

(黑龙江八一农垦大学农学院, 寒地作物种质改良与栽培重点实验室, 黑龙江大庆 163319)

**摘要:**【目的】膜下滴灌玉米种植模式在松嫩平原西部大面积推广, 研究该模式下不同叶龄追施不同氮肥量对玉米的干物质积累、氮肥利用及产量形成的影响, 可为建立该种植模式玉米施肥制度提供理论依据。【方法】在底施 N 60 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup> 的条件下, 设置 4 个追施尿素态氮肥水平处理: 0(N0)、40(N40)、90(N90) 和 140(N140) kg/hm<sup>2</sup>, 于叶龄指数为 30%、45%、60% 和 75% 时, 随滴灌进行追施, 以不追肥为对照(CK)。测定了不同处理玉米叶片光合效率、干物质积累和运转以及产量, 计算了氮肥的利用率。【结果】随着玉米生育进程, 在一定施肥范围内(0~150 kg/hm<sup>2</sup>), 玉米产量、叶面积指数、叶绿素含量、干物质积累、植株氮素积累、氮肥利用率、氮肥农学效率及氮收获指数均随施氮量的增加而增加, 当氮肥超过一定数量时(200 kg/hm<sup>2</sup>), 各指标增加不明显, 甚至下降。在叶龄指数为 45% 时追施 90 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥处理, 叶面积指数及叶绿素含量分别为 6.92 和 2.69 mg/g, 籽粒产量为 11957.89 kg/hm<sup>2</sup>, 干物质积累量、花后同化物输入籽粒量及花后同化物对籽粒的贡献率分别为 423.76 g/plant、14451.50 kg/hm<sup>2</sup> 和 85.86%; 氮肥利用率、氮肥农学利用率分别为 69.10% 和 38.38 kg/kg, 显著高于其他处理(P<0.05)。【结论】在松嫩平原西部膜下滴灌种植模式下, 在玉米叶龄指数为 45% 时追施 90 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥, 可显著提高光合利用率, 改善玉米生育后期的氮素吸收和干物质积累并增加产量, 提高玉米对氮肥的吸收利用效率。

**关键词:** 玉米; 膜下滴灌; 叶龄指数; 氮肥运筹; 松嫩平原

**中图分类号:** S147.32; S513      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1008-505X(2016)03-0811-10

## Suitable amount of N topdressing based on leaf age index of maize using mulched drip irrigation technology in Western Songnen Plain

LIU Hui-di, YANG Ke-jun\*, LI Zuo-tong, WANG Yu-feng, ZHANG Yi-fei, WANG Zhi-hui,  
FU Jian, GU Ying-nan, YANG Xi-ling, WU Qiong

(College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Germplasm Improvement and Cultivation in Cold Region, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

**Abstract:** 【Objectives】The mulched drip irrigation technology has been extended in the production of maize in Western Songnen Plain. Studying the suitable N fertilizer application amount and leaf age of maize under this technology system will provide a theoretical basis for efficient water and fertilizer efficiency and high-yield maize production. 【Methods】At the basal fertilizer levels of N 60 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup> and K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>, four topdressing levels of N 0, 40, 90 and 140 kg/hm<sup>2</sup> were top dressed at the leaf age index of 30%, 45%, 60% and 75%, respectively. Drip irrigation equipment was used for the fertilization. The photosynthetic efficiencies, the dry matter accumulation and the grain yields of corn in different growth stages were measured, and the N efficiencies

收稿日期: 2014-12-16      接受日期: 2015-05-04      网络出版日期: 2015-10-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B01-02); 粮丰工程项目(2011BAD16B11-03); 黑龙江省农垦总局科技计划项目(HNK125B-07-12)资助。

作者简介: 刘慧迪(1989—), 女, 黑龙江佳木斯人, 硕士研究生, 主要从事玉米高产理论与技术方面的研究。E-mail: liuhuidihd@126.com

\* 通信作者 Tel: 0459-6819170, E-mail: byndykj@163.com

were calculated. **【Results】** Along with the advancement of maize growth process, the grain yield, leaf area index, chlorophyll content, dry matter accumulation and nitrogen accumulation of maize, nitrogen utilization efficiency, nitrogen agronomic efficiency and nitrogen harvest index are increased with the raising of nitrogen application rate in a certain range (0–150 kg/hm<sup>2</sup>) of nitrogen application. When the nitrogen usage exceeds a certain amount (200 kg/hm<sup>2</sup>), there were no more increases or even fallen in the above items tested. In the treatment of topdressing at the leaf age index of 45% and the nitrogen application rate of 90 kg/hm<sup>2</sup>, the grain yield reaches to 11957.89 kg/hm<sup>2</sup>, the leaf area index and chlorophyll content are 6.92 and 2.69 mg/g, the dry matter accumulation amount, post-anthesis assimilate inputs to grains, and contribution of post-anthesis assimilates to grains are 423.76 g/plant, 14451.50 kg/hm<sup>2</sup>, and 85.86% respectively. And the nitrogen utilization efficiency and nitrogen agronomic efficiency are 69.10% and 38.38%. All the mentioned items are significantly higher than those in the other treatments ( $P < 0.05$ ). **【Conclusions】** In Western Songnen Plain under the mulched-drip irrigation condition, the suitable N topdressing amount is 90 kg/hm<sup>2</sup>, and preparatory leaf age for the practice is at leaf age index of 45%.

**Key words:** maize; mulched drip irrigation; nitrogen topdressing amount; leaf age index; Songnen Plain

松嫩平原是我国玉米主产区之一<sup>[1]</sup>,属农牧过渡地带和半湿润向半干旱地区的过渡带,年蒸发量为1200~1900 mm,远大于年降水量,且分布极不均匀,生态环境较为脆弱<sup>[2]</sup>,经常出现年降水量小于300 mm的情况<sup>[3]</sup>,尤其是春季,低温干旱频繁发生,常造成玉米播期延迟和保苗率低等问题。膜下滴灌是将覆膜种植与滴灌相结合的一种新型节水灌溉技术<sup>[4]</sup>,既有滴灌省水、省工、增产、高效、适用性强的优点,又发挥了地膜覆盖技术保水、保墒的作用<sup>[5-7]</sup>。近年来,膜下滴灌栽培技术已被广泛用于松嫩平原西部的玉米生产,有效缓解了玉米生育前期低温冷害和干旱少雨等问题。但松嫩平原西部玉米种植田土壤较瘠薄,保水保肥性较差,目前玉米膜下滴灌在氮肥管理上,大部分农户为了追求高产,仍然沿用传统常规种植模式的追肥方式,在玉米拔节期或大喇叭口期一次性追施大量氮肥,导致氮肥利用率低、资源浪费和环境污染严重<sup>[8-10]</sup>。

氮肥运筹作为调控土壤氮素运移分布<sup>[8]</sup>和促进作物氮素吸收利用过程<sup>[11-12]</sup>的重要技术措施,已逐渐成为滴灌施肥管理研究的热点问题之一。前人针对玉米膜下滴灌的施肥类型<sup>[13]</sup>、施肥量<sup>[14-15]</sup>和施肥频率<sup>[16]</sup>等方面开展了大量的研究工作。以叶龄制定氮肥运筹在水稻<sup>[17]</sup>和棉花<sup>[18-19]</sup>上应用较为广泛,在玉米上主要集中在夏玉米的研究<sup>[20]</sup>。20世纪70年代胡昌浩等<sup>[21]</sup>研究表明,玉米穗分化与各营养器官生长,特别是与叶龄指数存在着明显的相关关系。从拔节到抽穗阶段是春玉米一生中生长最快、吸收养分最多、丰产栽培最关键的时期,也是营养生长与生殖生长矛盾突出时期,因此正确运

用水肥,同时满足两者需要,对争取穗大粒多,夺取丰产极其重要。根据叶龄指数的动态发展,在玉米营养需求关键时期合理准确地追施氮肥,可以为玉米标准化栽培管理模式的建立提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验于2013年在黑龙江八一农垦大学试验基地(46°37'N, 125°11'E,海拔150 m)进行,试验地土壤为草甸土。0—20 cm 土层土壤有机质 25.95 g/kg、全氮 1.01 g/kg、碱解氮 134.50 mg/kg、速效磷 54.58 mg/kg、速效钾 32.42 mg/kg、pH 8.15。

### 1.2 试验设计

供试玉米品种为“郑单 958”,采用大垄双行覆膜栽培模式。供试肥料包括尿素(N≥46%)、磷酸二铵(N≥18%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥46%)和硫酸钾(K<sub>2</sub>O≥50%)。试验所有处理均底施 N 60 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>和 K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>。设定4个氮素(N)追施水平:0(N0)、40(N40)、90(N90)和140(N140) kg/hm<sup>2</sup>,追施在叶龄指数为30%(T30)、45%(T45)、60%(T60)和75%(T75),随滴灌进行。将氮肥充分溶解后倒入施肥罐中,开启水泵,30~40 min内肥液全部施入,共灌水200 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,以不追肥处理N0为对照(CK),总计13个处理,各处理3次重复,共39个小区,小区面积66 m<sup>2</sup>(4.4 m×15 m),随机区组排列。播种密度7.5×10<sup>4</sup> plant/hm<sup>2</sup>。整个生育时期,分别于30%、45%、60%和75%叶龄指数时期,共进行4次灌水,合计800 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,滴水量由水表和球阀控制,保证各小区灌水一致。其

他田间管理措施同大田膜下滴灌玉米生产, 10 月 5 日收获测产。

### 1.3 测定项目与方法

各小区沿滴灌带方向随机布置 3 个测试点, 在每个测试点选生长状况良好、具代表性的 6 株玉米植株挂牌标记, 于拔节初期以及拔节后每隔 15 d 测定所有完全展开叶片的长、宽(展开叶片系数为 0.75), 计算叶面积指数(LAI)。

同时分别于不同取样时期在各小区选取长势均匀具代表性的植株 6 株, 其中 3 株按叶、茎、鞘、雄穗、雌穗(苞叶、穗轴和籽粒)等器官分解植株, 于 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘干至恒重, 将称重后的样品磨碎后充分混合, 采用  $H_2O_2-H_2SO_4$  湿灰化法消煮, 用凯氏定氮仪(KjelFlex K-360, BüCHI)测定全氮含量, 计算植株的氮素吸收量。另外 3 株(吐丝前期自上而下取玉米第 3 片完全展开叶, 吐丝后取穗位叶片)用于叶绿素含量的测定<sup>[22]</sup>。成熟期收获考种、计产(以含水量 14% 折算产量)。

### 1.4 数据处理

氮肥利用率(NUE) = (施氮区植株总吸氮量 - 空白区植株总吸氮量) / 施氮量 × 100% ;

氮肥农学利用率(ANUE) = (施氮区产量 - 空白区产量) / 施氮量 × 100% ;

氮收获指数(NHI) = 籽粒吸氮量 / 植株氮素累积量 × 100%<sup>[23]</sup>。

参照 Cox 等<sup>[24]</sup>的方法计算群体干物质转运量(率)和花后同化物输入籽粒量及其对籽粒贡献率。

花前营养器官干物质转运量(DMT) = 开花期营养器官干重 - 成熟期营养器官干重 ;

花前营养体干物质转运率(DMTE) = 花前营养器官干物质转运量 / 开花期营养器官干重 × 100% ;

花后同化物输入籽粒量(CAA) = 成熟期籽粒干重 - 开花前营养器官干物质转运量 ;

花后同化物对籽粒的贡献率(CPAG) = 干物质转运量 / 成熟期籽粒干重 × 100%

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 9.0 进行试验数据整理与统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同氮肥运筹模式对玉米籽粒产量的影响

从图 1 可以看出, 玉米籽粒产量随施氮量的增加呈现先升高后降低的趋势, 不同追氮时期产量均在 N90 处理时最高, 且差异显著( $P < 0.05$ )。在同一追氮量下, 不同叶龄进行氮肥追施, 产量随施氮量增加至 90 kg/hm<sup>2</sup> 时达到最高, 之后下降。方差分析结果表明, 施氮量、追施氮肥时叶龄指数以及二者的交互作用对玉米产量影响达极显著水平( $P < 0.01$ )。在 T45N90 处理时玉米籽粒产量最高达 11957.89 kg/hm<sup>2</sup>, 显著高于 N0、N40 和 N140 处理 56.37%、22.89% 和 17.78%。

### 2.2 不同氮肥运筹模式下玉米叶面积指数的变化

由表 1 可知, 各叶龄时期施氮处理组合下, 玉米群体叶面积指数(LAI)呈单峰曲线变化, 均在拔节后 45 天出现峰值。拔节后 15 天时, 不同处理间 LAI 差异不显著( $P > 0.05$ ), 30 ~ 75 天时, 不同处理间 LAI 差异达显著水平( $P < 0.05$ )。在拔节后 30 天时, T30N90 处理除了与 T45N90 处理差异不显著外, 显著高于其他处理 2.13% ~ 43.22% ; 拔节后 45 ~ 75 天时, T45N90 处理 LAI 分别显著高于其他处理 6.19% ~ 35.59%、10.98% ~ 37.24% 和 7.66% ~ 26.15%。经方差分析表明, 施氮量及叶龄时期在拔节后 15 天对 LAI 影响显著( $P < 0.05$ ), 拔节后

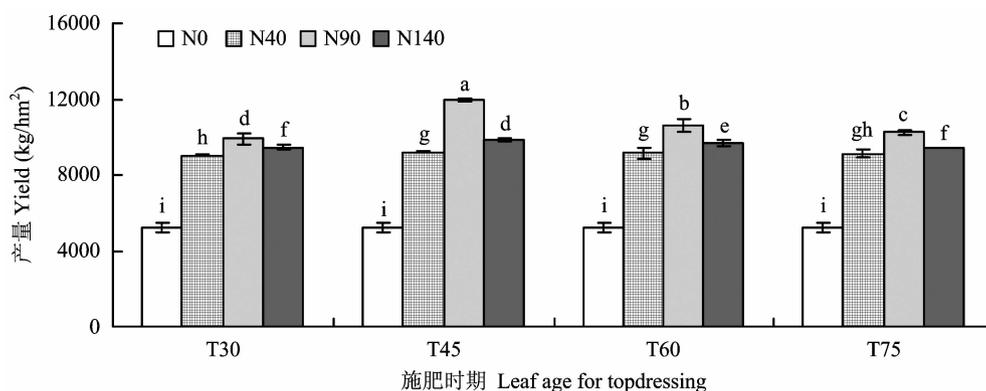


图 1 不同叶龄指数时追施氮肥水平对玉米籽粒产量的影响

Fig. 1 Effect of the nitrogen application with different leaf age periods and levels on grain yields of maize

[注 (Note): 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at 5% level among treatments.]

30~75 天时,施氮量、追施氮肥时叶龄指数以及二者的交互作用对 LAI 影响极显著( $P < 0.01$ )。在同一施氮水平下, LAI 由高到低顺序为 T45 > T60 > T30 > T75, 在同一追施叶龄下, LAI 顺序为 N90 > N140 > N40 > N0。这说明膜下滴灌种植模式下,通

过合理的氮肥运筹可以使玉米群体在生育前期 LAI 较快达到一定的峰值,且在 T45N90 处理时能够在生育中后期仍能维持较高的 LAI, 确保群体高光合效率水平。

表 1 不同叶龄时期和追施氮肥水平玉米叶面积指数

Table 1 Leaf area index of maize affected by leaf age index for nitrogen topdressing and amount

处理 Treatment		拔节后天数 Days after jointing (d)				
		15	30	45	60	75
叶龄指数 (%)	CK	0.56 ab	4.35 d	5.31 d	4.27 e	3.90 d
Leaf age index	30	0.57 a	6.02 a	6.35 b	4.97 c	4.17 c
	45	0.54 b	5.97 a	6.63 a	5.44 a	4.52 a
	60	0.55 ab	5.51 b	6.45 b	5.06 b	4.30 b
	75	0.56 ab	5.20 c	6.15 c	4.86 d	4.15 c
氮追施量 (kg/hm <sup>2</sup> )	N0	0.56 a	4.35 d	5.31 d	4.27 d	3.90 c
N topdressing amount	N40	0.55 a	5.41 c	6.09 c	4.81 c	4.17 b
	N90	0.57 a	5.87 a	6.72 a	5.34 a	4.50 a
	N140	0.55 a	5.74 b	6.46 b	5.10 b	4.18 b
叶龄指数 Leaf age index (L)		0.005 *	1.37 * *	0.37 * *	0.56 * *	0.27 * *
氮追施量 N topdressing amount (N)		0.004 *	0.67 * *	0.96 * *	0.85 * *	0.42 * *
L × N		4.94	0.032 * *	0.08 * *	0.14 * *	0.06 * *

注 (Note): 同列不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at 0.05% level; \* — $P < 0.05$ ; \* \* — $P < 0.01$ .

### 2.3 不同氮肥运筹模式玉米叶片叶绿素含量

如图 2 所示,在不同叶龄指数时期,对照玉米叶片叶绿素含量在拔节初到拔节后 30 天不断增加,45~75 天时缓慢下降。不同氮追施量处理(N40、N90 和 N140)玉米叶片叶绿素含量在拔节初~拔节后 45 天内迅速增加并达到峰值,45~75 天逐渐下降。叶龄指数为 30% 或 45% 时追施 N40、N90、N140 氮素处理在拔节后 15 天开始显著高于对照(N0); 而叶龄指数为 60% 和 75% 追施 N40、N90 和 N140 氮素处理时在拔节后 30 天显著高于对照。叶龄指数 45%、施氮量为 90 kg/hm<sup>2</sup> 水平时玉米叶绿素含量分别比同期 N0、N40 和 N140 处理高出 1.07、0.19 和 0.02 mg/g; 相比于叶龄指数 30%、60% 和 75% 的不同施氮水平处理,分别高出 5.93%~13.33%、3.43%~14.37% 和 6.35%~14.04%。总的来看,叶龄指数为 45%、追施 90 kg/hm<sup>2</sup> 能够显著增加玉米功能叶片的叶绿素含量,而追施 N140 水平时对于叶绿素含量的提升作用不明显。通过方差分析结果可知,施氮量、施氮叶龄时期以及二者的交互作

用对叶绿素含量均具有显著影响( $P < 0.05$ )。

### 2.4 不同氮肥运筹模式下玉米干物质的积累与分配

由图 3 可以看出,各处理在拔节初至拔节后 15 天干物质积累缓慢,15~45 天干物质含量迅速增长,60 天趋于稳定,而后略有下降。不同叶龄指数时期施氮均能提高玉米的干物质积累,拔节后 45 天起,各施氮处理均显著( $P < 0.05$ )高于对照。在拔节后 60 天时,T45N90 处理的干物质积累量最大,分别比 N0、N40、N140 高 223.76、46.76 和 24.76 g/plant,相比于叶龄指数为 30%、60%、75% 时不同追氮水平处理,分别高出 35.64%~45.23%、3.29%~20.17% 和 7.55%~22.81%。拔节后 75 天,T45N90 处理干物质积累量仍能维持相对较高的水平。在叶龄指数为 30% 和 45%、施氮量为 N140 时,干物质积累量均显著低于 N90 施氮水平,而叶龄指数为 60% 和 75% 时 N90 和 N140 处理间差异不显著( $P > 0.05$ ),且在拔节后 15~75 天时,T45N90 处理时的干物质积累量均高于其他处理。

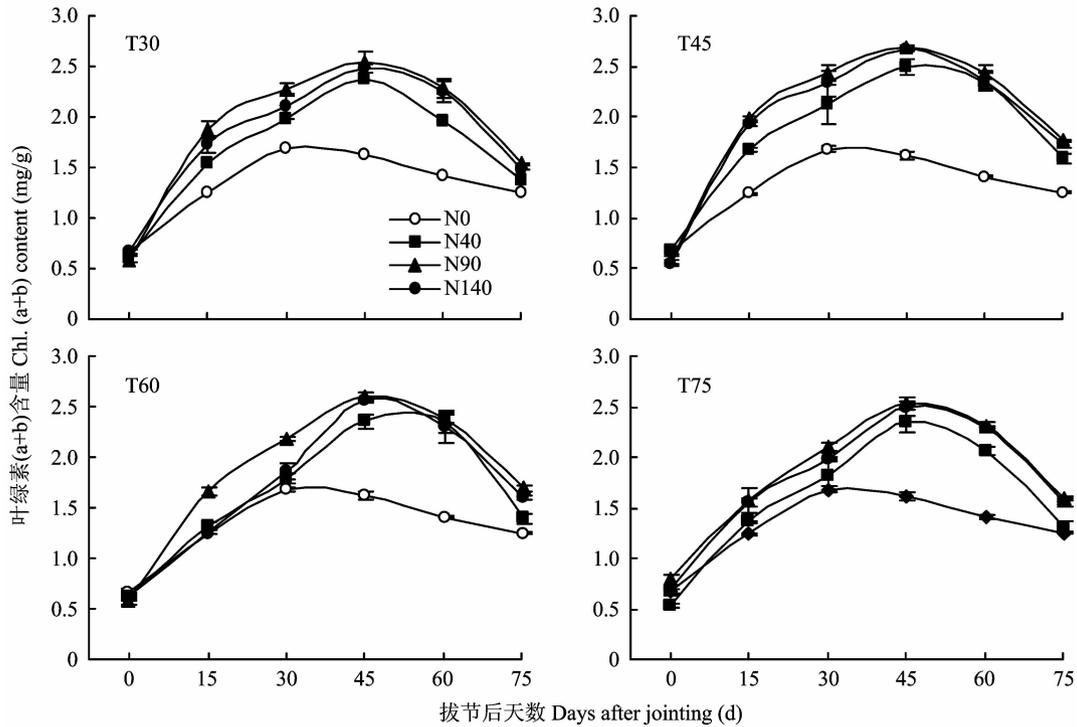


图 2 不同叶龄时期和追施氮肥水平玉米叶片在拔节后叶绿素含量变化

Fig. 2 Effect of the nitrogen application with different leaf age periods and levels on leaf chlorophyll contents of maize

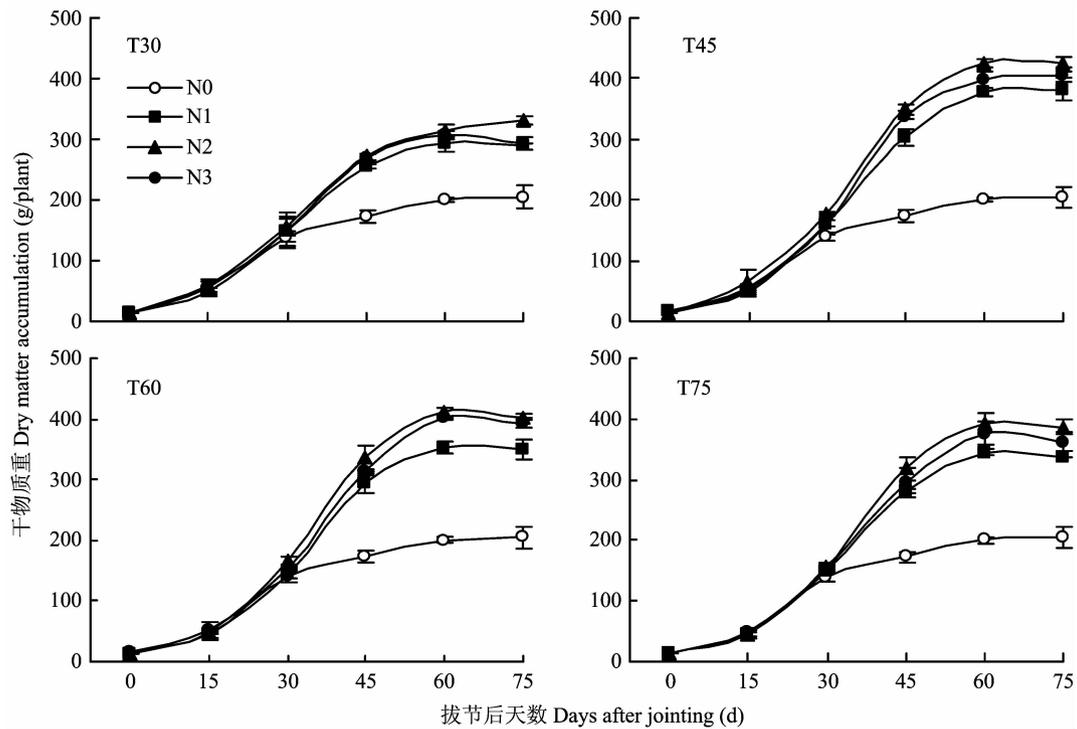


图 3 不同叶龄指数和追施氮肥水平玉米植株在拔节后干物质重变化

Fig. 3 Dry matter accumulation in different days after jointing stage of maize affected by different leaf age index for topdressing and different N levels

可见,在膜下滴灌种植方式下,T45N90 处理较其他处理更有利于玉米植株干物质的积累,但施氮量过

高,玉米植株干物质积累增加不明显,甚至限制其进一步增加。

由表 2 可以看出,各处理花前营养体干物质运转量和运转率均低于对照,同一叶龄指数时期二者由高到低顺序均为 N0 > N140 > N40 > N90,而花后同化物输入籽粒量和对籽粒的贡献率则均为 N90 > N140 > N40 > N0,在叶龄指数为 45%,追施 N90 处理时,花后同化物对籽粒的贡献率较其他追施时期分别高出 19.52%~29.76%、1.24%~4.84% 和 2.99%~7.74%。方差分析表明,施氮时期、施氮量以及二者间的互作对花前营养体干物质运转量、

花后同化物输入籽粒的量和对籽粒的贡献率的影响达极显著水平( $P < 0.01$ )。在 N90 施肥水平,各追施时期的营养体干物质运转率均小于 N40、N140 处理,但花后同化物对籽粒的贡献率均高于 N40、N140 处理,可见,在叶龄指数为 45%,N90 施氮水平可促进源库协调,使玉米生育后期维持较高的光合效率,有效提高了花后同化物输入籽粒量(CAA)及对籽粒贡献率(CPAG),进而增加玉米的干物质积累,提高产量。

表 2 不同叶龄时期和追施氮肥水平玉米干物质运转量、运转率及花前贮藏同化物对籽粒贡献率  
Table 2 Dry matter accumulation and their contribution to grain formation affected by N topdressing periods and levels

处理 Treatment		DMT (kg/hm <sup>2</sup> )	DMTE (%)	CAA (kg/hm <sup>2</sup> )	CPAG (%)
叶龄指数 (%)	CK	3828.58 a	31.04 a	4116.42 e	51.81 d
Leaf age index	T30	3594.36 b	26.92 b	7586.56 d	67.70 c
	T45	3205.92 c	20.77 c	12709.33 a	83.26 a
	T60	2404.33 d	16.16 d	11945.33 b	81.88 ab
	T75	1891.72 e	13.41 e	11279.28 c	79.68 b
	N0	3828.58 a	31.04 a	4116.42 d	51.81 c
氮追施量 N topdressing amount (kg/hm <sup>2</sup> )	N40	2708.35 c	19.49 c	9640.40 c	76.54 b
	N90	2509.71 c	16.30 d	12327.60 a	81.47 a
	N140	3104.19 b	22.15 b	10672.38 b	76.83 b
	叶龄指数 Leaf age index (L)		5323835.56 **	314.48 **	46462783.63 **
氮追施量 Topdressing amount (N)		1099099.35 **	102.97 **	22051706.44 **	100.65 **
L × N		737900.94 **	32.78 **	1190068.76 **	15.85 **

注 (Note): DMT—花前营养体干物质运转量 Dry matter translocation; DMTE—花前营养体干物质运转率 Dry matter translocation efficiency; CAA—花后同化物输入籽粒量 Post-anthesis dry matter accumulation; CPAG—花后同化物对籽粒的贡献率 Contribution of post-anthesis assimilates to grains; 同列不同字母表示差异达到 0.05 显著水平 Values followed by different letters within a column are significantly different at the 0.05 probability level; \*\* 表示处理因素间差异达 0.01 显著水平 Mean significantly different between treatment at 0.01 level.

## 2.5 不同氮肥运筹模式玉米氮素吸收及利用率

经方差分析(表 3)可知,施氮叶龄时期、施氮量以及二者的交互作用对玉米的氮素积累量、氮肥利用率、氮收获指数和氮肥农学利用率均达极显著水平( $P < 0.01$ )。在拔节后 15~60 天,各处理玉米群体氮素含量迅速增加,60~75 天增加缓慢,并在 75 天达到峰值,且同一叶龄时期施氮水平处理均表现为 N90 > N140 > N40 > N0, T45N90 处理在拔节后 45~75 天的氮素积累量,始终保持较高水平,且显著高于其他处理,玉米氮素积累量在拔节后 75 天分别比 T45N0、T45N40 和 T45N140 高出 103.32、78.32、30.53 kg/hm<sup>2</sup>;同时,相比于叶龄指数为 30%、60%、75% 时不同施氮处理水平,分别高出 25.73%~44.69%、3.56%~44.69% 和 12.97%

~49.24%。

氮肥利用率、氮肥农学利用率和氮收获指数同样在 T45N90 处理时达到最大值,且显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),其中氮肥利用率、氮肥农学利用率分别显著高于其他处理 9.37%~179.69% 和 27.09%~137.35%;随着施氮量的增加,氮收获指数增加,但在 N140 处理时,各个叶龄时期处理的氮收获指数下降,且总体上叶龄指数为 30%、45%、60% 时 N90 和 N140 处理差异不显著( $P > 0.05$ ),N0 和 N40 处理以及 75% 叶龄指数时期各氮素水平处理的氮收获指数均较低。综上,在 T45N90 处理时可以有效提高膜下滴灌条件下玉米对氮素的吸收及氮肥利用效率,但过低或过高的施氮量及延迟氮素施用均不利于氮收获指数的提高。

表 3 不同叶龄指数和追施氮肥水平玉米氮素吸收 (kg/hm<sup>2</sup>) 和利用率

Table 3 N uptake and utilization efficiency of maize affected by different topdressing leaf age periods and levels

处理 Treatment	拔节后天数 Days after jointing (d)					NUE (%)	NAE (kg/kg)	NHI (%)
	15	30	45	60	75			
叶龄指数 (%) Leaf age index	CK	18.86 e	57.46 d	75.71 e	106.92 d	145.25 e		37.87 c
博	T30	30.36 b	86.29 c	113.18 d	166.56 c	179.79 d	23.50 d	23.13 d
	T45	37.80 a	107.43 a	166.90 a	197.88 a	212.33 a	43.54 a	28.91 a
	T60	26.10 c	98.00 b	131.18 b	182.48 b	203.64 b	38.88 b	25.69 b
	T75	23.45 d	86.20 c	124.29 c	167.46 c	188.40 c	29.28 c	24.15 c
追施量 N topdressing amount	N0	18.86 c	57.46 d	75.71 d	106.92 d	145.25 d		37.87 c
	N40	25.55 b	84.27 c	114.15 c	147.92 c	168.46 c	22.21 c	29.49 a
	N90	32.17 a	102.54 a	162.16 a	206.86 a	226.58 a	54.28 a	29.95 a
	N140	30.56 a	96.62 b	125.34 b	181.01 b	193.08 b	23.91 b	16.98 b
叶龄指数 Leaf age index(L)		353.29 **	947.25 **	4855.99 **	1966.83 **	1936.14 **	741.85 **	57.30 **
氮追施量 N topdressing amount(N)		143.02 **	1042.82 **	7570.91 **	10476.28 **	10211.88 **	3774.34 **	649.36 **
L × N		40.60 **	855.14 **	377.19 **	538.17 **	388.19 **	132.39 **	27.08 **

注 (Note): NUE—氮肥利用率 N use efficiency; NAE—氮肥农学利用率 Agronomic efficiency; NHI—氮收获指数 N harvest index; 同列数值后不同字母表示差异达到 0.05 显著水平 Values followed by different letters within a column are significantly different at the 0.05 probability level; \* 表示处理因素间差异达 0.01 显著水平 Mean significantly different between treatments at 0.01 level.

### 2.6 不同氮肥运筹模式对玉米成熟期各器官吸氮量的影响

作物生长发育受养分吸收、同化及转运影响, 由图 4 可以看出, 各处理在成熟期叶片、茎秆 + 叶鞘、雄穗、苞叶以及籽粒的吸氮量均不同。在同一叶龄时期, 叶片、茎秆 + 叶鞘、籽粒的吸氮量均表现为 N90 > N140 > N40 > N0, 其中在 T45N90 处理

下, 叶片、茎秆 + 叶鞘的吸氮量分别比 N0、N40、N140 高 22.11、10.05、12.06 kg/hm<sup>2</sup> 和 8.71、14.81、0.22 kg/hm<sup>2</sup>。在玉米成熟期, 各施氮处理籽粒吸氮量在 T45N90 条件下达最大值, 占玉米总吸氮量的 49.69%, 显著 (P < 0.05) 高于其他器官, 其次为 T60N90 处理, 而 T30N40 施氮水平的吸氮量最小。雄穗和苞叶的吸氮量在叶龄指数为 45%、

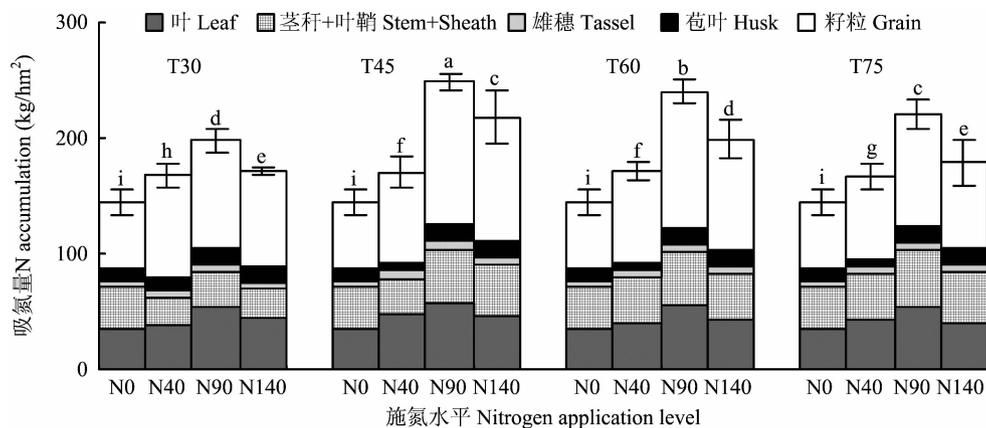


图 4 不同叶龄指数和不同追施氮肥水平玉米成熟期各器官吸氮量

Fig. 4 N uptake at maturity of maize under different N top dressing leaf age index and levels

[注 (Note): 柱上不同字母表示差异达 0.05% 显著水平 Different letters above the bars mean significant at 0.05% level.]

60%、75%追肥处理时差异不显著( $P > 0.05$ )。在 T45N90 处理时,整株的吸氮量显著高于其他处理( $P < 0.05$ )。综上,膜下滴灌条件下,在一定施氮范围内( $0 \sim 150 \text{ kg/hm}^2$ ),玉米成熟期全株吸氮量随施氮量的增加而增加,但过量施用氮肥,并不能增加籽粒的吸氮量,且在 T45N90 处理时有利于增加玉米的吸氮量,提高氮肥利用率。

### 3 讨论

叶龄能够准确地判断穗分化时期,但不同品种用来判断穗分化时期的主茎叶龄也不同,而不同品种在不同栽培条件下处于同一穗分化时期,可用一致的叶龄指数推断出其生育阶段,用于决定田间管理措施<sup>[25]</sup>。根据叶龄指数指导玉米在需肥关键时期进行补充氮肥,有利于提高玉米对氮素的吸收与利用,促进干物质积累,增加产量<sup>[26]</sup>。王宜伦等<sup>[27]</sup>研究表明,拔节期(叶龄指数为 30%)到灌浆中期是氮素吸收的关键时期,且在拔节期(30%叶龄指数)至抽雄期(88%叶龄指数)是营养生长与生殖生长同时并进的阶段<sup>[26]</sup>。本试验研究结果表明,在同一施氮量下,叶龄指数为 45% 追施氮肥处理较 30%、60%、75% 叶龄指数追肥处理的产量提高 4.80%~12.63%,干物质积累量提高 5.48%~27.26%,氮素积累量提高 4.09%~15.33%,且氮肥利用率、氮肥农学利用率显著高于其他处理。这可能因为此时玉米雌穗进入小花分化期,雄穗处于伸长期,叶片和茎秆生长旺盛,对氮素需求和吸收量较大,在该叶龄时期及时追施氮肥能够满足营养生长与生殖生长的需要,促进穗的分化,更有利于玉米对氮素的吸收利用,且在生育后期仍保持较高的氮素积累,满足玉米自身物质合成的需要,提高氮素利用效率,促进干物质积累,最终使产量显著增加,这与贾文凯<sup>[28]</sup>研究结果相似。而在 30% 叶龄指数追施氮肥,由于追肥时期过早,在生育后期氮肥供应不足,籽粒只能从叶片及茎秆+叶鞘中吸取养分,减少籽粒对氮素的吸收量;在 75% 叶龄指数追施氮肥,因为前期氮肥缺乏,后期虽供给氮肥,但源库过小,导致花后同化物输入籽粒量及花后同化物对籽粒的贡献率降低,影响叶片和茎秆+叶鞘的氮素向籽粒转移;在 60% 叶龄指数追施氮肥处理的产量、干物质积累量及氮素积累量高于 30% 及 75% 叶龄指数追肥处理,但低于 45% 叶龄指数追肥处理,分析其主要原因可能是本试验采用膜下滴灌追肥,促进土壤增温保墒,水肥互作使玉米提早达到需肥时期,而

45% 叶龄指数追施氮肥满足了作物对氮素的需求,且有研究表明在叶龄指数为 60% 时,叶面积已经基本形成<sup>[25]</sup>,而在 45% 叶龄指数追施氮肥能够促进玉米生育后期上部叶片宽大,增加叶面积,提高光合色素含量,使玉米群体光合系统达到较优水平,延长光合持效期。因此,45% 叶龄指数追肥处理较 30%、60% 以及 75% 叶龄指数追肥处理的干物质积累、氮素积累量、氮肥利用率以及氮肥农学利用率提高,进而增加产量。

合理的施氮量可以促进作物养分的吸收和干物质的积累,提高氮肥利用效率<sup>[29]</sup>。本试验研究结果表明,在同一叶龄时期,追施  $90 \text{ kg/hm}^2$  氮肥处理较追施  $40 \text{ kg/hm}^2$ 、 $140 \text{ kg/hm}^2$  氮肥处理玉米产量、干物质积累量、氮素积累量、氮肥利用率及氮肥农学利用率有显著的提高。这可能是因为施氮量过少引起氮素后期吸收不足,雌穗形成延迟,而过量地施用氮肥会使营养体氮素代谢旺盛,导致后期氮素向籽粒中转移量减少<sup>[30]</sup>,增加败育粒,对干物质积累量、氮素吸收与利用及产量形成造成不良影响。在本试验条件下, $90 \text{ kg/hm}^2$  氮肥处理可能是合理的施氮量,且在叶龄指数为 45% 追施氮肥能够调节花前干物质向花后籽粒的转运,促进生育后期干物质积累,提高氮肥利用效率,增加产量,起到增源扩库的作用。可见在膜下滴灌的条件下,氮肥的管理更应该考虑到施氮量,更应该注意追肥的叶龄时期,以提高氮素的吸收与利用,增加干物质积累,从而获得高产。但本试验只在松嫩平原西部草甸土进行了一年的试验,我们今后还将在其他地区及其他类型土壤上做进一步验证。

### 4 结论

在松嫩平原西部膜下滴灌的种植方式下,底肥水平一致的基础上,45% 叶龄指数时期追施  $90 \text{ kg/hm}^2$  氮肥,能够使玉米获得最佳的肥效表现。基于玉米叶龄指数进行合理的氮肥运筹,通过有效的增加叶面积指数和叶绿素含量,提高光合效率,促进光合产物的合成,进而提高植物干物质的积累量,且能显著提高氮肥利用率,为植株生育后期有充足的干物质以及氮素向籽粒转移提供保证,从而获得高产。

### 参考文献:

- [1] 陆景陵. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.

- Lu J L. Plant nutrition [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003.
- [2] Gao Q, Yu M, Yang X. An analysis of sensitivity of terrestrial ecosystems in China to climate change using spatial simulation [J]. *Climatic Change*, 2000, 47: 373-400.
- [3] 刘殿伟, 宋开山, 王丹丹, 张树清. 近 50 年来松嫩平原西部土地利用变化及驱动力分析 [J]. *地理科学*, 2006, 26(3): 277-283.
- Liu D W, Song K S, Wang D D, Zhang S Q. Dynamic change of land-use patterns in west part of Songnen Plain [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(3): 277-283.
- [4] 宋娜, 王凤新, 杨晨飞, 杨开静. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13): 98-105.
- Song N, Wang F X, Yang C F, Yang K J. Coupling effects of water and nitrogen on yield, quality and water use of potato with drip irrigation under plastic film mulch [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 98-105.
- [5] Haefele S M, Jabbar S M A, Siopongco J D L C, *et al.* Nitrogen use efficiency in selected rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under different water regimes and nitrogen levels [J]. *Field Crops Research*, 2008, 107: 137-146.
- [6] Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat [J]. *Field Crops Research*, 1999, 63: 79-86.
- [7] Shirvastava P K, Parikh M M, Sawani N G, *et al.* Effect of drip irrigation and mulching on tomato yield [J]. *Agricultural Water Manage*, 1994, 25: 179-184.
- [8] 侯红雨, 庞鸿宾, 齐学斌, 赵辉. 温室滴灌条件下  $\text{NH}_4^+$ -N 转化迁移规律研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(1): 48-52.
- Hou H Y, Pang H B, Qi X B, Zhao H. Study on the  $\text{NH}_4^+$ -N transformation and transport under drip irrigation in greenhouse [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(1): 48-52.
- [9] Nyiraneza J, Dayegamiye A N, Chantigny M H, *et al.* Variations in corn yield and nitrogen uptake in relation to soil attributes and nitrogen availability indices [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73: 317-327.
- [10] Li J, Zhang J, Rao M. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(2): 89-104.
- [11] 陈小莉, 李世清, 王瑞军, 等. 半干旱区施氮和灌溉条件下覆膜对春玉米产量及氮素平衡的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(4): 652-658.
- Chen X L, Li S Q, Wang R J, *et al.* Effect of film mulching on yield and nitrogen balance of spring maize under different nitrogen and irrigation treatments in semi-arid region [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(4): 652-658.
- [12] Yong J W H, Letham D S, Chin S, Farquhar G D. Effects of root restriction on growth and associated cytokinin levels in cotton (*Gossypium hirsutum*) [J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(10): 974-984.
- [13] 易镇邪, 王璞. 包膜复合肥对夏玉米产量、氮肥利用率与土壤速效氮的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 242-247.
- Yi Z X, Wang P. Effect of coated compound fertilizer on yield, nitrogen use efficiency and soil available nitrogen in summer maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 242-247.
- [14] Ayars J E, Phene C J, Hutmacher R B, *et al.* Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory [J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 42(1): 1-27.
- [15] Presterl T, Groh S, Landbeck M, *et al.* Nitrogen uptake and utilization efficiency of European maize hybrids developed under conditions of low and high nitrogen input [J]. *Plant Breeding*, 2002, 121: 480-486.
- [16] 鱼欢, 杨改河, 王之杰. 不同施氮量及基追比例对玉米冠层生理性状和产量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 266-273.
- Yu H, Yang G H, Wang Z J. Nitrogen rate and timing considerations on yield and physiological parameters of corn canopy [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 266-273.
- [17] 杨海生, 张洪程, 杨连群, 等. 依叶龄运筹氮肥对优质水稻产量与品质的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(3): 19-26.
- Yang H S, Zhang H C, Yang L Q, *et al.* Effects of nitrogen operations according to leaf-age on yield and quality in good-quality rice [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(3): 19-26.
- [18] 刘新永, 田长彦. 棉花膜下滴灌水氮耦合效应研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 286-291.
- Liu X Y, Tian C Y. Coupling effect of water and nitrogen of cotton under plastic mulching by drip irrigation [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 286-291.
- [19] Dong H Z, Li W J, Tang W, *et al.* Yield, quality and leaf senescence of cotton grown at varying planting dates and plant densities in Yellow River valley of China [J]. *Field Crops Research*, 2006, 98: 106-115.
- [20] 童淑媛, 宋凤斌, 徐洪文. 玉米抽雄期不同叶位叶片生理特性的研究 [J]. *江苏农业学报*, 2009, 25(1): 44-48.
- Tong S Y, Song F B, Xu H W. Study on physiological characteristics of blades in different leaf positions of maize at heading stage [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 25(1): 44-48.
- [21] 曹彬, 张世杰, 孙占育, 等. 玉米叶龄指数与穗分化回归关系的研究初报 [J]. *玉米科学*, 2005, 13(1): 86-88.
- Cao B, Zhang S J, Sun Z Y, *et al.* Research report of regression relationship between leaf number index and spike differentiation in maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2005, 13(1): 86-88.
- [22] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

- Li H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [ M ]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [23] 李强, 王朝辉, 李富翠, 等. 氮肥管理与地膜覆盖对旱地冬小麦产量和氮素利用效率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(1): 93-100.
- Li Q, Wang Z H, Li F C, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on yield and nitrogen use efficiency in winter wheat growing on dryland with plastic film mulching [ J ]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(1): 93-100.
- [24] Cox M C, Qualset C O, Rains D W. Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat: I. Dry matter and nitrogen accumulation to grain [ J ]. Crop Science, 1985, 25: 430-435.
- [25] 郭庆法, 王庆成, 汪黎明. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
- Guo Q F, Wang Q C, Wang L M. Maize cultivation science of China [ M ]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2004.
- [26] 于立河, 李金峰, 郑桂萍. 粮食作物栽培学[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2001.
- Yu L H, Li J F, Zheng G P. Food crop cultivation [ M ]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 2001.
- [27] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 339-347.
- Wang Y L, Li C H, Tan J F, *et al.* Effect of postponing N application on yield, nitrogen absorption and utilization in super-high-yield summer maize [ J ]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(2): 339-347.
- [28] 贾凯文. 寒地玉米叶龄施肥模式的建立与应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2010.
- Jia K W. Establishment and application of leaf age fertilizer model of corn in cold region [ D ]. Harbin: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2010.
- [29] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮时期对超高产夏玉米产量及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1099-1107.
- Lü P, Zhang J W, Liu W, *et al.* Effects of nitrogen application dates on yield and nitrogen use efficiency of summer maize in super-high yield conditions [ J ]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5): 1099-1107.
- [30] 赵洪祥, 边少锋, 孙宁, 等. 氮肥运筹对玉米氮素动态变化和氮肥利用的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(3): 122-129.
- Zhao H X, Bian S F, Sun N, *et al.* Effects of nitrogen application on nitrogen dynamic changes and nitrogen use efficiency in maize [ J ]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(3): 122-129.