

# 光周期对青饲玉米耐高氮的调控效应

江 院<sup>1,2</sup>, 张向前<sup>1,2</sup>, 解新明<sup>1,2</sup>, 卢小良<sup>2\*</sup>

(1 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广州 510642; 2 华南农业大学 广东省草业工程技术研究中心, 广州 510642)

**摘 要:**以光周期敏感型‘华农 1 号’青饲玉米为材料, 在大田条件下, 设置  $N_1$  (75 kg/hm<sup>2</sup>)、 $N_2$  (225 kg/hm<sup>2</sup>)、 $N_3$  (375 kg/hm<sup>2</sup>) 3 个氮素水平和 3 个光周期处理 (16 h、13 h 和 10 h), 分析了其在不同光照长度条件下耐高氮胁迫的能力, 探讨光周期对玉米氮高效相关的农艺性状和光合特性指标的影响。结果表明, (1) 16 h 光照处理下, 玉米植株的根长、根表面积、根体积分别比 10 h 处理增加了 113.19%、45.73% 和 97.71%, 叶片叶绿素含量与净光合速率比 10 h 处理分别提高 97.90% 和 60.24%, 且根长、根体积、叶绿素含量和净光合速率在 16 h 和 10 h 处理下差异极显著; 16 h 处理与 10 h 处理叶片数的平均相差值 (12) 显著, 根系直径随光周期延长逐渐减小, 但光周期对植株分蘖数无显著影响。(2) ‘华农 1 号’青饲玉米地下部和地上部部分农艺性状指标, 在 16 h 长光照处理下随氮素水平的提高而增加, 表现出耐高氮胁迫的生物学特征; 在 10 h 短光照处理下氮素水平过高相关性状指标反而下降。(3) 随着光照时间逐渐延长, 地上部生物量逐渐显著增加。研究发现, 光周期敏感型‘华农 1 号’青饲玉米具有较强的耐高氮能力, 长光周期促进了其植株营养生长阶段的生长发育, 增强了其对高氮的适应能力。

**关键词:** 玉米; 根长; 光周期; 氮素

**中图分类号:** Q945.79

**文献标志码:** A

## Regulatory Effects of Photoperiod on High Nitrogen Tolerance in Ensilage Corn

JIANG Yuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiangqian<sup>1,2</sup>, XIE Xinming<sup>1,2</sup>, LU Xiaoliang<sup>2\*</sup>

(1 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Guangdong Engineering Research Center for Grassland Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Under the conditions of 16 h light/8 h dark, 13 h light/11 h dark and 10 h light/14 h dark, the authors studied the effects of photoperiod on agronomic traits and photosynthetic characteristics of ensilage corn ‘Huanong 1’, at different nitrogen levels of  $N_1$  (75 kg/hm<sup>2</sup>),  $N_2$  (225 kg/hm<sup>2</sup>),  $N_3$  (375 kg/hm<sup>2</sup>). The capacity of tolerating high nitrogen stress was analyzed. The results showed that: (1) the root length, root surface area and root volume were increased by 113.19%, 45.73% and 97.71%, respectively, under 16 h light, compared with 10 h light. The contents of chlorophyll and net photosynthesis rate of leaves were higher by 97.90% and 60.24% under 16 h light. The leaf number under 16 h light was twelve more than that under 10 h light, with extremely significant difference. While photoperiod did not influence plant tiller number significantly. (2) Root diameter was decreased gradually with the extension of photoperiod. ‘Huanong 1’ ensilage corn displayed the biological characteristics of resisting high nitrogen stress under 16 h light, and the indexes of root morphology and some agronomic traits were improved with increasing of nitrogen level, but the traits indexes declined gradually with the increasing of nitrogen level under 10 h light. (3) As the photoperiod extended gradually, aboveground biomass also increased significantly. Therefore, the authors believed that long photoperiod promoted the growth and development of photoperiod sensitive corn

收稿日期: 2015-05-06; 修改稿收到日期: 2016-01-22

基金项目: 国家科技攻关计划课题; 广东奶业现代化生产技术集成与产业化研究项目 (2002BA518A18)

作者简介: 江 院 (1979—), 男, 博士, 实验师, 主要从事植物生理生化研究。E-mail: jiangyuan9901@163.com

\* 通信作者: 卢小良, 研究员, 主要从事饲草作物栽培与育种研究。E-mail: lxlspe.love@163.com

‘Huanong 1’, and also enhanced the adaptation ability of it to high nitrogen.

**Key words:** corn; root length; photoperiod; nitrogen

基于农业经济效益与生态环境保护的双重要求,提高氮肥利用率已成为农学家日益关注的问题。氮肥利用率的高低与氮肥施用技术的不断优化及作物本身对氮素的吸收能力密切相关。田间玉米氮肥优化试验研究发现,在  $10\text{ t/hm}^2$  玉米籽粒产量的条件下,最佳施氮量(纯氮)为  $200\text{ kg/hm}^2$  左右,此时氮效率约为  $46\text{ kg/kg}$ ,随施氮量的进一步增加,产量不再增加,氮效率则大幅下降<sup>[1]</sup>。2007 年米国华等通过对玉米氮素吸收利用能力的研究表明,氮高效品种应具有良好的根系性状(发达的根系、功能期长)与叶片性状(较大的叶面积、保绿性好)<sup>[2]</sup>。

研究表明,氮肥利用率与氮素吸收量之间存在显著正相关<sup>[3-4]</sup>。而吸氮量与根系大小之间呈显著正相关<sup>[5-6]</sup>。光周期可通过对碳水化合物分配的调节,影响根的形态,并改变根冠比<sup>[7]</sup>,最终改变根系对养分的吸收<sup>[8-10]</sup>。孙雄松等研究显示,通过光周期调节,可以使玉米形成发达的根系,提高氮肥吸收利用率,同时使绿叶功能期延长,延缓早衰<sup>[11]</sup>。Brouquisse 等<sup>[12]</sup>报道,在短日照条件下玉米氮代谢能力下降,氮素同化产物含量也逐渐降低。Alfoldi 等<sup>[13]</sup>研究表明,在  $16\text{ h}$  光照条件下,玉米杂交种植株对硝态氮的吸收能力最强,根部和地上部生物量显著增加。氮素供应量和光照条件是获得高硝酸还原酶活性的必要条件,Santos 等<sup>[14]</sup>发现,随着光周期时间的延长,硝酸还原酶活性提高,玉米叶片中硝酸盐含量逐渐增加,植株生长加快,叶片蛋白质含量也随之出现变化。Morrison<sup>[15]</sup>认为,硝酸还原酶活性对光周期的长短反应敏感,通过光周期信号调控玉米相关基因的表达,可以间接影响植株叶片及根部氮代谢活力,进而影响植株对氮素的吸收与同化。

自从科学家 Garner 和 Allard 发现光周期影响植物开花以来,多数学者的研究集中于光周期对植物开花及花芽分化等生殖生长的影响,而忽视了其营养生长特性的影响<sup>[16]</sup>。到目前为止,国内有关农作物的高产优质栽培措施的研究,主要是围绕水肥的调控<sup>[17-19]</sup>、种植模式的更新和种植密度的改善等因素进行<sup>[20]</sup>。植物的碳氮代谢是通过生长发育过程中营养遗传特性的表达而起作用的,有关光周期营养遗传特性与氮代谢关系的研究较少。因此,深入分析光周期与氮素的高效吸收和利用规律,不仅是氮高效新品种选育的重要理论基础,对于优化

氮肥施用技术也具有指导意义。

目前,中国牧草饲料大部分依赖进口,国内饲料作物的种植技术远不能满足畜牧业发展的需求<sup>[21]</sup>。本试验试图通过研究不同氮素水平下,光周期对‘华农 1 号’青饲玉米氮高效生物学特性的影响,揭示光照长度对光周期敏感型青饲玉米耐高氮的调控效应,以期选育氮高效型的青饲玉米品种,形成高产、优质的栽培技术理论提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料

试验品种‘华农 1 号’青饲玉米,系墨西哥类玉米与甜玉米的远缘杂交种(*Zea mays* L. var. *rugosa* Bonaf × *Zea mexicana* Iltis cv. Huanong 1)<sup>[22]</sup>,属于光周期敏感型品种<sup>[11]</sup>,它具有抗病虫、耐肥水、喜高温、分蘖和刈割再生能力强等特点。墨西哥类玉米是栽培玉米最近缘的种类,原产于墨西哥和中美洲一带,与玉米杂交可育<sup>[23]</sup>。

本试验在华南农业大学教学科研基地进行。土壤基本理化性质如下:pH 6.45,有机质  $3.260 \times 10^4\text{ mg/kg}$ ,全氮  $1.785 \times 10^3\text{ mg/kg}$ ,全磷  $1.110 \times 10^3\text{ mg/kg}$ ,全钾  $1.26 \times 10^4\text{ mg/kg}$ ,碱解氮  $79.95\text{ mg/kg}$ ,速效磷  $40.30\text{ mg/kg}$ ,速效钾  $105.90\text{ mg/kg}$ <sup>[24]</sup>。

试验所施用的氮肥为尿素,N 含量为 46.31%,磷肥为过磷酸钙, $\text{P}_2\text{O}_5$  含量为 10.78%,钾肥为氯化钾, $\text{K}_2\text{O}$  含量为 60%,有效成分测定方法见《土壤农业化学分析方法》<sup>[25]</sup>。

### 1.2 试验设计

采用双因素随机区组试验设计,设 3 个光照长度处理:16、13 和  $10\text{ h}$ ,以及 3 个氮素(纯 N)水平  $\text{N}_1$  ( $75\text{ kg/hm}^2$ )、 $\text{N}_2$  ( $225\text{ kg/hm}^2$ )、 $\text{N}_3$  ( $375\text{ kg/hm}^2$ ),3 次重复,共计 27 个小区,随机区组排列。小区面积为  $30\text{ m}^2$ ,起垄栽培,每小区种植 60 株,株距为  $50\text{ cm}$ ,行距  $1\text{ m}$ 。以尿素作为氮源施用,1/2 作为种肥,1/2 作为追肥,于拔节前全部施入土壤。磷肥和钾肥作为基肥一次性施入土壤,每小区处理施用量为  $\text{K}_2\text{O}$   $100\text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$   $150\text{ kg/hm}^2$ 。在小区四周设立支架,天黑前光照下降时,开灯进行补光处理,光源是  $40\text{ W}$  白炽灯,相距  $2\text{ m}$ ,距植株顶高  $30\sim 50\text{ cm}$ <sup>[26]</sup>。从植株拔节期至抽雄期将黑膜覆盖于支架上进行遮光处理,16、13、 $10\text{ h}$  处理的遮光时间分别是 23:00~

7:00、20:00~7:00 和 17:00~7:00。

1.3 调查测定项目及方法

抽雄后期测量植株株高、茎粗和分蘖数;在乳熟期(植株果穗中部籽粒胚乳呈乳汁状,用指甲可以划破)<sup>[27]</sup>每个小区选取代表性植株 6 株,测定植株叶面积(SHY-150 型叶面积仪)、叶片数、叶绿素含量、地上部生物量、净光合速率和根系形态指标。试验过程中病虫草害防治与常规的栽培管理措施相同。

选取植株上部着生部位相同且无病害的叶片进行叶绿素含量和净光合速率测定。叶绿素含量参照杨振德<sup>[28]</sup>的方法测定。叶片净光合速率于上午 9:00~11:00 用美国思爱迪公司生产的 CID-310 型光合速率仪进行测定。根系取样采用土壤剖面法,以植株为中心取长 60 cm(垂直于行向)、宽 20 cm(沿行向)的面积,分层取样(0~200 cm 土体分 0~20、20~40、40~60、60~100、100~200 cm,5 层)。土壤挖出后,装入网袋。用冲根器冲洗根系,剔除杂质,吸干根系样品表面水分,用于测定根系形态指标;在盛有浅层水的透明塑料扫描盒中将根整理分开,排列有序,进行彩色扫描,并用 WinRHIZO 软件(Rgent Instrument Inc.,Canada)进行根长、根表面积、根体积、根直径等指标的分析测定。

1.4 数据处理

用 SAS 和 Microsoft Excel 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 光氮处理对收获期玉米植株根系形态的影响

试验结果(表 1)表明,收获期不同光照处理间,

植株根系形态指标差异极显著。同一氮素水平下随着光照时间的延长,根长、根表面积及根体积逐渐显著增加,植株根系的根长平均值在 16 h 光照下比 13 h 和 10 h 光照分别高出 38.94%、113.19%;根表面积 16 h 处理分别比 13 h 和 10 h 处理平均高出 25.12%、45.73%;根体积 16 h 分别比 13 h 和 10 h 平均高出 32.58%、97.71%。而根直径指标则与根长、根表面积、根体积等指标刚好表现出相反的趋势,随着光照时间的延长,根直径的值逐渐显著减小。同一光照处理下,根表面积、根体积、根直径都随着氮素水平的提高而显著增加;而根长在 16 h 光照下,随着氮素的增加而增加,在 13 h 和 10 h 光照下却随着氮素水平的增加而变短。可见,长光照能显著促进玉米根系伸长生长,但导致根变细,并在根长和根体积上与高氮素营养存在正向交互效应。

2.2 不同光照处理和氮素水平对收获期植株生长的影响

2.2.1 分蘖数 从图 1 可以看出,收获期植株分蘖数在不同氮素水平下存在差异。同一光照处理下,植株分蘖数随氮素水平的提高而逐渐增加,且氮素水平间差异显著;在同一氮素水平下,各个光照处理间植株分蘖数无明显变化,差异不显著。试验结果表明,植株的分蘖数受光周期影响不显著,而受氮素水平影响较显著。

2.2.2 株高 同一氮素水平下,随着光照时间的延长,植株的株高有逐渐增加的趋势(表 2)。16 h 光照处理下植株平均株高分别比 13 h 和 10 h 处理高出 53.50%、62.37%,不同光照处理间差异极显著。

表 1 收获期不同光照时数和氮素水平下植株根系形态指标

Table 1 Root morphology indexes in different light lengths and nitrogen levels at harvest stage

处理 Treatment	根长 Root length/cm	根表面积 Root surface area/cm <sup>2</sup>	根体积 Root volume/cm <sup>3</sup>	根直径 Root diameter/mm
L <sub>16</sub> N <sub>75</sub>	129 841.8±107.1c	22 083.5±13.5c	571.1±11.4c	0.430 6±0.017 8i
L <sub>16</sub> N <sub>225</sub>	135 194.5±104.6ab	24 596.5±24.6bc	583.0±12.5b	0.432 5±0.032 3h
L <sub>16</sub> N <sub>375</sub>	141 449.1±29.7a	25 977.3±11.5a	606.2±20.5a	0.440 4±0.005 2g
L <sub>13</sub> N <sub>75</sub>	99 874.3±140.1d	17 791.7±26.2f	429.9±10.8ef	0.463 1±0.051 8f
L <sub>13</sub> N <sub>225</sub>	97 897.4±120.2ef	19 588.7±31.3e	439.7±13.8e	0.467 8±0.072 4e
L <sub>13</sub> N <sub>375</sub>	94 799.5±120.9f	20 687.2±17.2de	458.1±21.1d	0.472 5±0.033 2d
L <sub>10</sub> N <sub>75</sub>	65 993.6±100.5g	15 880.3±30.8i	274.8±3.3i	0.479 2±0.017 1c
L <sub>10</sub> N <sub>225</sub>	63 681.7±100.6h	16 589.2±15.0h	297.9±11.8h	0.485 0±0.012 1b
L <sub>10</sub> N <sub>375</sub>	60 993.3±130.1i	17 386.6±19.5g	317.6±15.5g	0.499 7±0.020 6a

注:表中数据为 3 次重复的平均值和标准误,同列数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异(Duncan's 新复极差法);. L<sub>16</sub>N<sub>75</sub>表示 16 h 光照长度,75 kg/hm<sup>2</sup> 氮素水平处理,依次类推;下同。

Note:Data in the table is the mean of three replicates with standard error,the different normal letters in same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level (DMRT). L<sub>16</sub>N<sub>75</sub> indicates 16 hours photoperiod and 75 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen level,and so on. The same as below.

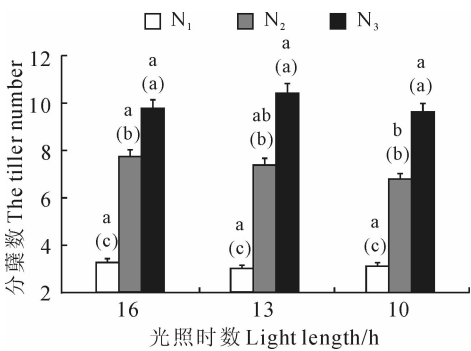
在 13 h 和 10 h 光照条件下,株高都随着氮素水平的增加而降低;在 16h 光照条件下,不同氮素水平间植株株高差异不显著。试验结果说明,长光照影响了高氮素营养对玉米株高的抑制效应。

**2.2.3 茎粗** 表 2 的试验结果表明,玉米植株的茎粗随着光周期延长逐渐增加。其中,在同一氮素水平下,16 h 处理植株茎粗显著高于 13 h 和 10 h 处理,且彼此间差异达极显著;同一光照处理下,随着氮素水平的增加茎粗逐渐增大,且差异显著。

**2.2.4 叶片数和叶面积** 同一氮素水平下,随着光

照时间增加植株绿叶面积和叶片数逐渐上升(表 2),其中植株叶片总数在 16 h 处理下分别比 13 h 和 10 h 光照处理平均极显著增加 7 和 12 片。在 16 h 光照下,植株叶面积和叶片数也随着氮素水平的增加逐渐增大,且差异显著。13 h 和 10 h 光照下,随着氮素的增加,植株叶面积和叶片数呈现先升后降的趋势,高氮水平下叶面积和叶片数反而低于中氮水平;同一光照处理内各个氮素水平间的叶片数差值平均为 2~5 片。由此可以看出,高氮素水平下 16 h 长光照能抑制绿叶面积和叶片数的减少。

**2.2.5 地上部生物量** 由图 2 可以看出,光照处理对植株地上部的生长发育产生显著影响。同一氮素水平下,各个光照处理间,植株地上部生物量差异明显,达到显著水平,总体上看 16 h 光照处理的生物量明显高于 13 h 和 10 h 处理,16 h 处理地上部平均生物量与 13 h 和 10 h 相比分别高出 63.41%、117.34%。同一光照处理的不同氮素水平下,植株地上部生物量也出现差异,高氮水平下地上部生物量最高,低氮水平下生物量相对最低,中氮水平介于高氮和低氮水平之间,相互间差异亦达显著水平。



柱上括号外不同字母表示同一氮素水平光照处理间在 0.05 水平差异显著,而括号内不同字母表示相同光照处理下氮素水平间在 0.05 水平存在显著差异;N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub> 分别为 75 kg/hm<sup>2</sup>、225 kg/hm<sup>2</sup> 和 375 kg/hm<sup>2</sup> 氮素水平;下同

图 1 收获期不同氮素水平和光照处理下植株分蘖数

The different normal letters out of bracket at the top of post indicate significant difference between different light lengths within the same nitrogen level at 0.05, while the different normal letters in bracket stand for significant difference between different nitrogen levels within the same light length at 0.05 level; N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub> and N<sub>3</sub> stand for 75 kg/hm<sup>2</sup>, 225 kg/hm<sup>2</sup> and 375 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen level, respectively; The same as below

Fig. 1 The number of tiller between different nitrogen levels and light lengths at harvest stage

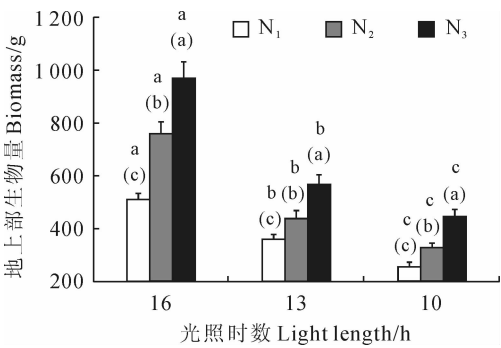


图 2 收获期不同氮素水平和光照处理下地上部生物量  
Fig. 2 The biomass of aboveground between different nitrogen levels and light lengths at harvest stage

表 2 收获期植株部分农艺性状指标

Table 2 Agronomic character indexes of plants at harvest stage

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/cm	叶片数 No. of leaves	叶面积 Leaf area/cm <sup>2</sup>
L <sub>16</sub> N <sub>75</sub>	383.50±2.86a	2.162±0.053c	25.25±0.28c	11 244.4±8.01c
L <sub>16</sub> N <sub>225</sub>	384.15±2.55a	2.326±0.032b	27.75±0.36b	16 688.2±2.66b
L <sub>16</sub> N <sub>375</sub>	385.65±2.40a	2.482±0.018a	31.50±0.58a	25 569.6±1.12a
L <sub>13</sub> N <sub>75</sub>	254.10±0.51b	1.912±0.361e	19.50±0.15e	8 288.1±1.31f
L <sub>13</sub> N <sub>225</sub>	250.63±0.76c	2.044±0.054d	23.25±0.32c	13 181.2±10.02d
L <sub>13</sub> N <sub>375</sub>	246.63±0.88d	2.166±0.063c	20.25±0.26d	11 006.1±1.35e
L <sub>10</sub> N <sub>75</sub>	245.02±1.32d	1.378±0.077h	13.5±0.66g	4 105.9±1.44i
L <sub>10</sub> N <sub>225</sub>	236.35±1.39e	1.536±0.069g	18.75±0.36e	7 489.8±1.32g
L <sub>10</sub> N <sub>375</sub>	228.90±1.63f	1.966±0.046f	16.5±0.52f	5 096.2±3.65h

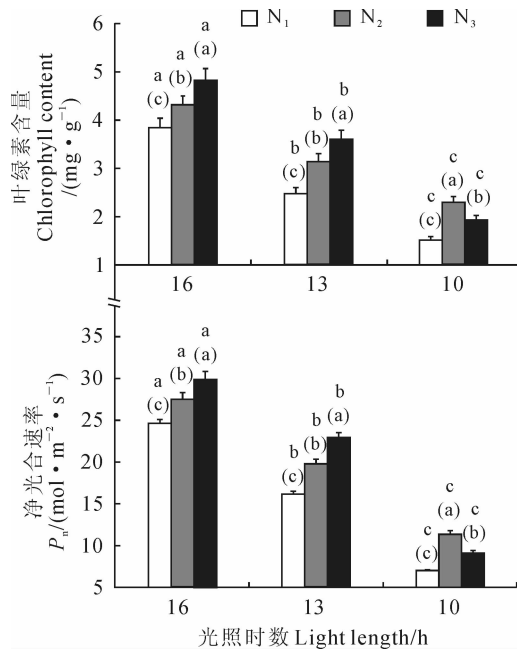


图3 收获期不同光照处理和氮素水平下叶片叶绿素含量和净光合速率

Fig. 3 The leaf chlorophyll content and net photosynthetic rates between different nitrogen levels and light lengths at harvest stage

### 2.3 光氮复合处理对收获期植株叶片叶绿素含量和净光合速率的影响

图3显示,同一氮素水平下,叶片叶绿素含量随光照时数的增加而增加,处理间差异显著。其中,16 h光照处理下叶绿素平均含量比13 h和10 h处理分别高出29.30%、97.90%;在16 h和13 h光照下,叶绿素含量随氮素水平的提高呈逐渐增加的趋势,且差异显著;而在10 h光照下,叶绿素含量表现为先上升后下降的变化趋势。由此说明,长光照处理下植株对高氮素水平的耐受性更强,叶片持绿期更久。

同时,同一氮素水平下,随光照时间的延长植株叶片净光合速率逐渐提高(图3),16 h光照处理下平均净光合速率分别比13 h和10 h处理显著高出21.07%、60.24%。16 h和13 h光照处理下净光合速率随着氮素水平的提高而增加,且各氮素水平间差异显著;而在10 h光照处理下,叶片净光合速率随氮素水平的提高表现为先升后降,且不同氮素处理间差异显著。以上结果表明,10 h光照处理下植株耐高氮能力较差,叶片净光合速率在高氮素营养下出现下降,而16 h、13 h长光照与氮素的交互效应使净光合速率一直保持在较高水平。

## 3 讨 论

光周期对植物生长的影响可能部分归因于光周期对根系形态的影响,进而影响植株根系对养分的吸收<sup>[8-10]</sup>。本试验结果表明,16 h光照处理植株根系的平均根长、根表面积、根体积均比13 h和10 h光照处理的高。而根直径则随着光照时间的延长而逐渐减小。王艳等<sup>[29]</sup>研究表明延长光照时间,有利于地上部向根分配更多的碳水化合物,表现为地下部干重及根体积、根长等形态指标显著增加,从而促进根系生长,增加根系对养分的吸收能力。本试验显示,16 h光照处理下植株根系比13 h和10 h处理植株根系发达,具体表现在根长、根体积、根表面积和根直径上,这与前人的研究结果基本一致。白书农<sup>[30]</sup>研究发现,光周期对植株生长发育的影响不仅仅限于花芽或花分生组织的形成,从营养性叶到其他所有器官的形态建成都在不同程度上受到光周期的影响。本试验中,根系的根长在16 h光照处理下随着氮素的增加而增加,在13 h和10 h处理下,随着氮素水平的增加而变短。由此可见,16 h光照处理与氮素互作能显著促进根系的生长发育,有利于根系对养分吸收能力的提高。对根长和根体积而言,光照处理和氮素水平互作效应显著,这说明光周期会干扰氮素水平对某些根系形态指标的影响。

来自于玉米多样性中心的热带玉米具有广泛的遗传基础,具备许多温带种质所不具备的优良性状,根系发达,叶片功能期长、叶绿素含量高,是拓宽玉米遗传种质的优良素材<sup>[29]</sup>。而引种到长日照地区的热带种质表现出营养生长旺盛,叶片增多,叶面积变大,株高、茎粗增加等,短日照条件下,植株生育期缩短,过早成熟甚至出现早衰,叶片数减少、叶面积下降,其原因可能是氮代谢能力下降<sup>[31-32]</sup>。本试验所用品种‘华农1号’为热带墨西哥类玉米与甜玉米远缘杂交种,具有热带玉米种质遗传特性。试验结果显示,在13 h和10 h光照处理下,植株株高随着氮素水平的提高反而有所降低,叶片数、叶面积在高氮水平下也开始出现下降趋势。植株分蘖数随氮素用量的提高而增多,但各光照处理间分蘖数差异不显著。16 h光照处理下,植株株高、叶片数、叶面积并不随氮素水平的提高而下降,表现出较强的耐高氮胁迫能力;同一氮素水平下,16 h处理的株高显著高于13 h和10 h处理,即长光照对‘华农1号’地上部的生长起到明显的调控促进效应。同时,光

周期长短对‘华农 1 号’青饲玉米植株茎粗也产生影响,随着光照时间延长茎粗逐渐极显著增加。氮素的施用也使植株茎粗增加,但效果不如光照处理明显。由此可见,长光照下‘华农 1 号’地上部各项性状指标均优于短光照处理,这与前人对热带种质玉米的研究结果基本相同;光周期敏感性促进了热带玉米在长日照条件下的利用,对植株地上部生物学性状影响较大。至于长光照影响‘华农 1 号’玉米生长发育的机理尚不是十分明确,今后可以从长光信号的光受体着手研究,探讨植株光受体相关基因与调控植株营养生长的相关基因之间的关联性。

Spieriz<sup>[33]</sup>研究表明,过量施氮将引起叶片早衰及光合能力的下降,进而导致同化产物含量降低。本试验中,16 h 长光照处理与 10 h 短光照处理相比,植株叶片叶绿素含量高 97.90%,绿叶面积增加 220.53%;同时,16 h 长光照处理下,高氮水平比中氮水平净光合速率提高 6.8%,而 10 h 短光照处理则下降 16%,出现碳氮代谢不平衡的现象。以上结果表明收获期 10 h 短光照处理的植株出现过量施氮引起早衰及光合能力下降的现象,而在 16 h 长光照处理下仍保持了较高的光合作用能力,耐高氮胁迫能力强。张福锁<sup>[34]</sup>研究认为,玉米每公顷施氮 100 kg 是实现高产最理想施肥量,当施氮量超过 220 kg 后产量就开始下降。在本研究中,16 h 长光照处理植株叶片的净光合作用速率随着氮素水平的提高而增加,采用 375 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮量植株净光合作用速率仍较强;而 10 h 光照处理下随氮素水平的提高,净光合速率则出现下降的趋势,施纯氮 375 kg/hm<sup>2</sup> 时比施纯氮 225 kg/hm<sup>2</sup> 的净光合速率低,叶绿素含量下降。以上结果表明,光周期能够影响玉米耐高氮胁迫能力,长光照条件下氮效率高,相应的叶绿素含量、净光合作用速率亦较高,而在短光照下玉米的耐高氮能力较差,随氮素水平的提高相应

的叶绿素含量、净光合作用速率反而降低。长光照促进植株耐高氮胁迫的生理机制目前尚不是很清楚,有待进一步研究。

本试验结果同时表明,光周期对植株地上部生物量有显著的调控作用。随着光照时数的延长,植株地上部生物量增加。同时增施适量的氮肥也能促进植株地上部生长,但光照处理的效应超过了氮素对生物量的影响。在 16 h 长光照信号调节下,植株耐高氮能力较强,根系发达,叶绿素含量高,光合作用强,进而导致生物量增加,促进了植株营养体生长,没有出现氮素过高而引起植株早衰生物量下降的情况。白书农等<sup>[35]</sup>研究表明,长光照信号促使植株前期蹲苗,促进地下部生长,拔节期以后植株地上部生长迅速,生物量和株高明显增加。Hunter 等<sup>[36]</sup>的研究也显示,光照时间越长,植株的营养生长量越大,具体表现为叶片数增加、茎节长度增长、植株干物质质量增加。本试验的结果与 Hunter 等的研究结果基本相同。长光照促进植株地上部生物量增加,可能与光信号调节植物昼夜节律钟,促进营养体生长有关,今后可以从光信号对植物生理钟的调控方面进一步研究。

综上所述,在 16 h 长光照条件下,光周期敏感型‘华农 1 号’青饲玉米地上部营养生长阶段生长发育好,植株高大,根系发达,绿叶面积多;同时对高氮素水平的耐受性较强,从而延长了植株绿叶功能期,保持了后期植株旺盛的光合能力,在一定程度上延缓了植株衰老,表现出一定的耐高氮胁迫能力。长光照处理促进了‘华农 1 号’青饲玉米地下根系和地上部营养体的生长,地上和地下部相互促进最终使植株地上部生物量明显增加。今后可以进一步从分子生物学和遗传学角度,摸索其光周期营养遗传特性,拓宽青饲玉米种质资源的遗传基础。

## 参考文献:

- [1] 张福锁,米国华,刘建安. 玉米氮效率遗传改良及其应用[J]. 农业生物技术学报,1997,5(2):112-117.  
ZHANG F S, MI G H, LIU J A. Advances in the genetic improvement of nitrogen efficiency in maize[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 1997, 5(2):112-117.
- [2] 米国华,陈范骏,春亮,等. 玉米氮高效品种的生物学特征[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(1):155-159.  
MI G H, CHEN F J, CHUN L, et al. Biological characteristics of nitrogen efficient maize genotypes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(1):155-159.
- [3] 米国华,刘建安,张福锁. 玉米氮效率生理生化基础及遗传改良进展[J]. 玉米科学,1997,5(2):9-13.  
MI G H, LIU J A, ZHANG F S. Physiological and biochemical mechanism of corn nitrogen efficiency and genetic improvement progress[J]. *Journal of Maize Science*, 1997, 5(2):9-13.
- [4] 米国华,刘建安,张福锁. 玉米杂交种的氮农学效率及其构成因素剖析[J]. 中国农业大学学报,1998,3(S):97-104.  
MI G H, LIU J A, ZHANG F S. Analysis on agronomic nitrogen efficiency and its components of maize hybrids[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1998, 3(S):97-104.
- [5] 王艳,米国华,陈范骏,等. 玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性[J]. 生态学报,2003,23(2):297-302.  
WANG Y, MI G H, CHEN F J, et al. Genotypic differences in

- nitrogen uptake by maize inbred lines and its relation to root morphology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(2):297-302.
- [6] WANG Y, MI G H, CHEN F J. Response of root morphology to nitrate supply and its contribution to nitrogen uptake in maize[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, **27**:2189-2202.
- [7] MOZAFAR A, SCHREIBER P, OERTLI J. Photoperiod and root-zone temperature; interacting effects on growth and mineral nutrients of maize[J]. *Plant and Soil*, 1993, **153**(1):71-78.
- [8] SALISBURY F B. Encyclopedia of Plant Physiology: Responses to Photoperiod[M]. New York: Wadsworth Publishing Company, 1981:135-167.
- [9] VINCE P D. Photoperiodism in Plants[M]. London: McGraw-Hill High Education Press, 1975:361-364.
- [10] ALLISON J C, DAYNAR T B. Effect of change in time of flowering induced by alter in photoperiod or temperature on attributes related to yield in maize[J]. *Crop Science*, 1979, **19**(1):1-4.
- [11] 孙雄松, 卢小良, 董朝霞. 光周期遗传特性对青饲料生长和养分吸收的影响[J]. 华南农业大学学报, 2004, **25**(SII):60-63.
- SUN X S, LU X L, DONG Z X. Effects of photoperiod on growth and nutrient uptake in silage corn[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2004, **25**(SII):60-63.
- [12] BROUQUISSE R, GAUDILLERE J P, RAYMOND P. Induction of a carbon-starvation-related proteolysis in whole maize plants submitted to light/dark cycles and to extended darkness[J]. *Plant Physiology*, 1998, **117**(4):1281-1291.
- [13] ALFOLDI Z, PINTER L, FEIL B. Accumulation and partitioning of biomass and soluble carbohydrates in maize seedlings as affected by source of nitrogen, nitrogen concentration, and cultivar[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1992, **15**(11):2567-2583.
- [14] SANTOS I, ALMEIDA J M, SALEMA R. Influence of nitrogen nutrition on growth, nitrate reductase and nitrite reductase of seedlings of maize (*Zea mays* L. cv. LG 12)[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1992, **15**(11):2531-2544.
- [15] MORRISON, KRISTIN M, SIMMONS, et al. Loci controlling nitrate reductase activity in maize; ultravioletB signaling in aerial tissues increases nitrate reductase activity in leaf and root when responsive alleles are present[J]. *Physiologia Plantarum*, 2010, **140**(4):334-341.
- [16] ADAMS S R, HADLEY P, PEARSON S. The effect of temperature and photoperiod on the flowering and morphology of trailing petunias[J]. *Acta Horticulturae*, 1997, **435**:65-75.
- [17] 赵 平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究[J]. 生态科学, 1998, **17**(2):37-42.
- ZHAO P, SUN G C, PENG S L. Ecophysiological research on nitrogen nutrition of plant[J]. *Ecologic Science*, 1998, **17**(2):37-42.
- [18] 曾希柏. 土壤肥力生物热力学及其理论进展[J]. 土壤通报, 1996, **27**(6):273-276.
- [19] 薛青武, 陈培元. 土壤干旱条件下氮素营养对小麦水分状况和光合作用的影响[J]. 植物生理学报, 1990, **16**(1):49-56.
- XUE Q W, CHEN P Y. Effects of nitrogen nutrition on water status and photosynthesis in wheat under soil drought[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1990, **16**(1):49-56.
- [20] 沈秀瑛, 戴俊英, 胡安畅. 玉米群体冠层特征与光截获及产量关系的研究[J]. 作物学报, 1993, **19**(3):246-252.
- SHEN X Y, DAI J Y, HU A C, et al. Studies on relationship among character of canopy light interception and yield in maize populations[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1993, **19**(3):246-252.
- [21] 崔国文. 中国牧草育种工作的发展、现状与任务[J]. 草业科学, 2008, **25**(1):38-42.
- CUI G W. Perspective, present and tasks in forage breeding in China[J]. *Pratacultural Science*, 2008, **25**(1):38-42.
- [22] 卢小良. 青饲玉米抗性育种的远缘杂种优势试验[J]. 华南农业大学学报(自然科学版), 1993, **14**(4):133-137.
- LU X L. Distant hybrid vigor experimentation in silage corn resistance breeding[J]. *Journal of South China Agricultural University* (Nat. Sci. Edi.), 1993, **14**(4):133-137.
- [23] 梁祖铎. 饲料生产学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1979:60-62.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:200-500.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:100-625.
- [26] 张凤路, S. MUGO. 不同玉米种质对长光周期反应的初步研究[J]. 玉米科学, 2001, **9**(4):54-56.
- ZHANG F L, S. MUGO. Primary study on the effect of long photoperiod on different maize germplasm[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2001, **9**(4):54-56.
- [27] 于振文. 作物栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995:153-179.
- [28] 杨振德. 分光光度法测定叶绿素含量的探讨[J]. 广西农业大学学报, 1996, **15**(2):145-150.
- YANG Z D. Studies on the determination of chlorophyll content by spectrophotometric method[J]. *Journal of Guangxi Agricultural University*, 1996, **15**(2):145-150.
- [29] 王 艳, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米根系形态对光照、氮水平反应的基因型差异[J]. 土壤肥料, 2001, (3):12-16.
- WANG Y, MI G H, CH F J, et al. Genetic difference on root morphology under different light intensity and N levels of maize[J]. *Soils and Fertilizers*, 2001, (3):12-16.
- [30] 白书农, 谭克辉. 对光敏水稻研究的回顾与反思: 植物光周期现象中叶片信息对茎端的形态建成事件有专一性吗[J]. 科学通报, 2001, **46**(9):788-792.
- [31] 何 萍, 金继运, 林 葆. 氮肥用量对春玉米叶片衰老的影响及其机理研究[J]. 中国农业科学, 1998, **31**(3):66-71.
- HE P, JIN J Y, LIN B. Effect of N application rates on leaf senescence and its mechanism in spring maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, **31**(3):66-71.
- [32] HOLLAND J B, GOODMAN M M. Combining ability of tropical maize accessions with U. S. germplasm[J]. *Crop Science*, 1995, **35**:767-776.
- [33] SPIERIZ J H, VOS J. Wheat Growth and Modeling[M]. New York: Plennm Press, 1986:129-141.
- [34] 张福锁. 土壤与植物营养研究新动态[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995:159-169.
- [35] 白书农. 植物发育生物学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003:80-165.
- [36] HUNTER R B, HUNT L A, KANNENBERG L W. Photoperiod and temperature effects on corn[J]. *Journal of Plant Sciences*, 1974, **54**(1):71-78.

(编辑:裴阿卫)