

花后氮肥调控对春玉米叶片光合性能及产量的影响

陈日远¹, 马倩¹, 杨艳¹, 刘鹏¹, 阚凤玲¹, 崔振岭²

(1.北京嘉博文生物科技有限公司, 北京 100080; 2.中国农业大学, 北京 100020)

摘要: 为研究花后追施氮肥对春玉米产量、根系及叶片光合性能的影响, 本试验根据春玉米全生育期氮肥调控方案(INM)的最优施氮量(ONR)基础上, 在春玉米吐丝期(R1)、乳熟期(R2)设置3个追氮处理, R1、R2期不追施氮肥(N1处理); R1、R2期按照ONR方案追施氮肥(N2处理); R1、R2期在ONR方案基础上氮肥施用量增加50%(N3处理)。通过2年田间试验结果表明, 与花后不再追施氮肥相比(N1), 花后追施氮肥(N2、N3)能显著增加玉米功能叶的SPAD值和R2期叶面积指数(LAI), 在每次追氮10 d后可提高穗位叶净光合速率(P_n), 从而维持春玉米长灌浆时间和高灌浆速率, 产量平均增加13.2%、22.0%。春玉米吐丝后28 d, 取0~60 cm土层玉米根系分层分析后表明, 花后追氮对春玉米总体根系形态和总根重无显著影响, 但显著增加了10~20 cm和50~60 cm土层的根长和根表面积, 对玉米后期延衰、维持叶片功能和养分、水分吸收有促进作用。在R1、R2期分别增施50%施氮量(N3), 较N2(ONR)处理的春玉米叶片光合性能、根系形态及产量均有提高趋势。

关键词: 春玉米; 花后追氮; 产量; 光合速率(P_n); 根系形态

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Applied N Post-Anthesis on Photosynthetic Property of Leaf and Grain Yield for High-Yielding Spring Maize Production

CHEN Ri-yuan¹, MA Qian¹, YANG Yan¹, LIU Peng¹, KAN Feng-ling¹, CUI Zhen-ling²

(1. Beijing Goldenway Bio-tech Co., Ltd., Beijing 100080;

2. China Agricultural University, Beijing 100020, China)

Abstract: This study aimed to evaluate maize physiological, root system, and yield changes in response to in-season nitrogen management (INM) with respect to post-silking N fertilization of spring maize. N2 (ONR) determined for INM by subtracting soil nitrate-N content measured at the maize root layers from the target N value. N3 treatment with the same N application pre-silking as N2 and plus an additional application of 50% of the target N value at silking stage (R1) and milking stage (R2). N1 treatment control with the same N application pre-silking as N2 and N3, but non-topdressing N at post-silking. Compared with N1 treatment, the average yield of N2, N3 increased by 13.2% and 22.0%. Added N application post-anthesis (N2, N3) can increase functional leaves SPAD value, leaf area index (LAI), which can slow the aging of maize and increased intensity of photosynthesis of maize and the net photosynthetic rate (P_n) of panicle leaves could be increased after 10 days of nitrogen topdressing. Added N application post-anthesis did not significantly increase the total of root length, root surface area and root weight. However, root length and root surface area in the 10–20 cm and 50–60 cm soil layers were significantly increased by nitrogen application post-anthesis. In addition, N3 was showed an increasing trend in leaf photosynthetic performance, root morphology, and yield of spring maize compared to N2 (ONR) treatment.

Key words: Spring maize; Postponing N application; Yield; Photosynthetic rate; Root morphology

实现玉米高产对于保障我国的粮食安全至关重要^[1,2]。大量研究表明, 我国玉米产量还有较大的提

升空间, 运用科学合理的肥料运筹, 特别是氮肥管理有助于玉米产量提升^[3]。玉米对氮肥敏感, 耐肥性强, 氮肥的合理运筹对于进一步提高玉米产量和氮肥利用率、减轻环境压力具有重要意义^[4-6]。在目前一些高产研究中, 产量的提升主要是通过增加施肥量来实现, 而且主要是以超量施氮为主, 缺少对氮肥

录用日期: 2022-02-21

作者简介: 陈日远(1987-), 山东日照人, 高级农艺师, 主要从事植物营养、新型肥料研发及应用推广工作。

Tel: 18265105958 E-mail: riyuan1023@126.com

的精准调控研究^[7,8]。已有研究表明,高产与中高产玉米的干物质累积及氮素吸收差异主要体现在中后期,其中吐丝后尤为重要^[9,10]。杨国航等^[11]研究表明,施氮量为 225 kg/hm² 分底肥、苗肥、拔节肥、穗肥、粒肥分次施用时,前期施肥有利于营养库的加大,后期施氮肥则对后期干物质积累有好处,并且促进了干物质从营养体向子粒中转移。玉米生育后期若氮素供应受到限制会导致产量和氮素吸收的显著下降,而从 8 叶期到灌浆后 3 周,充足的氮素供应有利于产量的提高^[12]。赵世诚^[13]、王宜伦^[14]等研究发现,氮肥后移在保证作物高产的同时可节约氮肥 30%,在总施氮量不变的情况下,氮肥后移比习惯施氮增产 2.27%~5.33%,氮肥利用效率也有所提高。孟庆峰等^[15]通过试验,建立了玉米全生育期氮肥调控方案(INM),即在玉米播种前、6 叶期(V6)、10 叶期(V10)、吐丝期(R1)和乳熟期(R2)分段调控氮肥施入量,可显著提高玉米产量和氮肥利用效率。但在春玉米生长后期,尤其是吐丝期以后精准氮素供应对春玉米生物量累积、叶片的持绿性、光合作用、

生理状况以及对根系形态的影响还相对缺乏认识。本研究基于玉米全生育期氮肥调控方案(INM)^[15],在花后进行氮肥精准调控,探索华北春玉米生育后期叶片持绿性、光合性能提高、根系活力保持、子粒干物质累积量增加的氮素管理策略,为实现春玉米高产高效提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

该试验于 2010 年、2011 年 5~9 月在中国农业大学曲周试验站进行。气候属暖温带半湿润大陆性季风气候区,年平均气温 13.1℃。7 月份最热,平均气温为 26.8℃,极端最高气温为 41.1℃;1 月份最冷,平均气温为-2.9℃,极端最低气温为-19.9℃。年平均无霜期 201 d,10℃以上积温 4 472.0℃·d。年平均降雨量为 556.2 mm,降水主要集中在 7~9 月份,占全年降雨量的 2/3。试验期间天气条件见表 1。

试验田块 0~30 cm 深度土壤的基本养分性状见表 2。

表 1 春玉米生长期气象条件
Table 1 Meteorological conditions during spring maize growing period

| 月 份 Month | 2010 年 | | | 2011 年 | | |
|--------------|------------------|---------------|-----------------------|------------------|---------------|-----------------------|
| | 平均气温 | 降雨量(mm) | 太阳辐射 | 平均气温 | 降雨量(mm) | 太阳辐射 |
| | (℃) | Amount of | (MJ /m ²) | (℃) | Amount of | (MJ /m ²) |
| | Mean temperature | precipitation | Amount of solar | Mean temperature | precipitation | Amount of solar |
| 5 | 21.15 | 28.40 | 744.93 | 19.97 | 22.70 | 587.28 |
| 6 | 26.30 | 41.20 | 697.35 | 26.37 | 15.60 | 600.84 |
| 7 | 27.69 | 112.90 | 589.90 | 26.81 | 121.00 | 609.07 |
| 8 | 24.27 | 113.70 | 435.24 | 24.26 | 97.20 | 451.61 |
| 9 | 19.90 | 58.70 | 359.27 | 17.75 | 105.80 | 362.31 |

表 2 供试土壤理化性质
Table 2 Physical and chemical characters of the tested soil

| 土壤质地 | pH 值 | 有机质(g/kg) | 全氮(g/kg) | 速效磷(mg/kg) | 速效钾(mg/kg) |
|--------------|----------|-----------|----------|------------|-----------------------|
| Soil texture | pH value | O.M. | Total N | Olsen-P | NH ₄ OAc-K |
| 粉质壤土 | 7.8 | 10.3 | 0.67 | 5.0 | 74 |

根据玉米全生育期氮肥调控方案(INM),玉米氮素理论供应值是根据玉米目标产量及不同生育期的需氮量进行计算得出^[16],玉米每个生育期的最优氮施氮量(ORN)是由氮素供应目标值减去相应生育期土壤中无机氮(Nmin=土层中的硝态氮+铵态氮)含量而确定^[17]。本试验共设置 3 个处理:N1 处理,根据 INM 在玉米吐丝前按 ORN 进行氮素供应,吐丝期以后不再追施氮肥;N2 处理,按玉米 ORN 进

行全生育期氮素供应(吐丝期、乳熟初期追施 2 次氮肥);N3 处理,在玉米吐丝前按 ORN 供应氮肥,吐丝期、乳熟初期在 ORN 基础上各增加 50% 氮素供应量。上述所有处理,在吐丝期以前如果计算出的最优施氮量(N)<30 kg/hm²,每个处理均供应氮(N)30 kg/hm²。氮素理论供应目标值、土壤 Nmin 及氮素供应实际值见表 3。

表3 氮素供应目标值和实际供应值
Table 3 Nitrogen supply target and value of the actual supply

| 年 份 Year | 生长期 Growing stage | 根系区 Rootzone | 氮素供应目标值(kg/hm ²) Nitrogen supply target | | | 土壤中无机氮(kg/hm ²) Nmin in the soil | | | 氮素供应实际值(kg/hm ²) Value of the actual supply | | |
|-------------|----------------------|-----------------|--|-----|-----|---|-----|-----|--|----|-----|
| | | | N1 | N2 | N3 | N1 | N2 | N3 | N1 | N2 | N3 |
| | | | | | | | | | | | |
| 2010 | 播前 | 0~30 cm | 80 | 80 | 80 | 65 | 63 | 66 | 30 | 30 | 30 |
| | V6 | 0~60 cm | 130 | 130 | 130 | 109 | 111 | 110 | 30 | 30 | 30 |
| | V10 | 0~90 cm | 130 | 130 | 130 | 120 | 125 | 123 | 30 | 30 | 30 |
| | R1 | 0~90 cm | 0 | 170 | 260 | 114 | 112 | 110 | 0 | 58 | 145 |
| | R2 | 0~90 cm | 0 | 140 | 220 | 73 | 102 | 113 | 0 | 38 | 97 |
| 2011 | 播前 | 0~30 cm | 80 | 80 | 80 | 63 | 65 | 66 | 30 | 30 | 30 |
| | V6 | 0~60 cm | 130 | 130 | 130 | 111 | 112 | 109 | 30 | 30 | 30 |
| | V10 | 0~90 cm | 130 | 130 | 130 | 95 | 94 | 93 | 30 | 30 | 30 |
| | R1 | 0~90 cm | 0 | 170 | 260 | 107 | 111 | 106 | 0 | 49 | 151 |
| | R2 | 0~90 cm | 0 | 140 | 220 | 69 | 74 | 122 | 0 | 66 | 88 |

注: V6、V10 分别代表玉米的6叶期和10叶期; R1、R2 分别代表吐丝期、子粒建成期。氮素供应实际值=氮素供应目标值-土壤 Nmin, 若氮素供应值<30 kg/hm², 按 30 kg 氮投入。
Note: V6, V10, represent the 6-leaf stage of corn and 10-leaf stage; R1 represent the silking and R2 represent the blister stage. Value of the actual supply= Nitrogen supply target- Nmin in the soil, If Value of the actual supply was less than 30 kg/ ha, the 30 kg N / hawas applied.

磷肥用量(P₂O₅): 生长季共施用 135 kg/hm², 播前施用 90 kg/hm², V10 期施用 45 kg/hm²。钾肥用量(K₂O): 生长季共施用 150 kg/hm², 播前施用 80 kg/hm², V10 期施用 70 kg/hm²。

小区面积为 5 m×5 m=25 m², 随机区组排列, 4 次重复, 供试品种为超试 1 号。于 2010 年 5 月 26 号、2011 年 5 月 24 号机械播种, 行距 60 cm。播种前灌水造墒, 保证出苗整齐; 播后苗前用除草剂进行土壤封闭除草, 出苗后三叶期进行人工间苗, 株距 19 cm, 保留密度 8.5 万株/hm²。在玉米生育期内进行病虫害防治。在玉米达到生理成熟即乳线完全消失、黑层出现时收获。

1.2 测定项目与方法

收获时, 每个小区去除两个边行, 收获中间的 6 行, 面积为 2 m×3.6 m, 收获 7.2 m² 面积上的全部果穗, 称鲜重。取其中 6 个具有代表性的果穗称鲜重并进行考种, 调查穗粒数、千粒重; 然后烘干至恒重, 脱粒称重, 计算果穗含水量, 并计算收获面积内全部果穗干重, 最后以含水量 14% 的重量折算小区产量。收获指数=子粒干重/总生物量×100%

在吐丝后第 0、8、14、21、29、35、41、49 和 64 天, 每小区取具有代表性植株样品 2 株, 于 105℃ 杀青 30 min, 75℃ 烘干至恒重, 称干重。在吐丝后第 0、14、29、41 和 64 天取植株样品, 测量叶面积。叶面积=Σ L(叶片最大长度)×W(最大宽度)×0.75, 计算叶面积指数(LAI)。分别于吐丝后的第 0、12、20、27 和

41 天, 每个小区选连续的 30 株, 采用 SPAD -502 型叶绿素仪测定穗位叶、穗上叶和穗下叶 SPAD 值。采用 LI- 6400 型便携式光合作用测定系统, 于吐丝后的第 0、10、20、30 和 40 d, 在天气晴朗的上午(9 ~ 11 点), 测定植株穗位叶(中上部)的光合速率(P_n)。

在吐丝后第 29 天取根系样品, 每小区选取连续的有代表性的植株 2 株, 将地上部植株铲除后, 用铁锹、铲子等工具将玉米行左右各 30 cm(行距为 60 cm) 与 2 株玉米所占的行长 38 cm 范围内的土取出, 取土深度为 60 cm, 每 10 cm 株作为一层, 将挖出的规则土体(60 cm×38 cm×10 cm) 用水冲洗、拣根, 放入封口袋中, 并迅速放入-20℃冰柜中贮存。所取根系用爱普生 V700 型号扫描仪进行扫描(扫描前要解冻处理), 扫描的文件通过 WinRHIZO 软件分析各层的根系长度、表面积以及根系直径; 扫描完成后将根样烘干至恒重, 称干重。

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010、SAS 9.2、Sigmaplot 12.2 等软件进行数据处理, 统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 玉米子粒产量及产量结构

从表 4 可以看出, 花后追施氮肥(N2、N3)能够显著增加玉米子粒产量, 与后期不追氮肥(N1)相比, 花后追施氮肥均能提高春玉米产量。2010 年结果表明, 花后追施氮肥(N2 和 N3)后产量分别增加

表4 花后追施氮肥对产量及其产量构成的影响

Table 4 Effects of nitrogen fertilizer after flowering on the yield and components of the yield

| 年份 Year | 处理 Treatment | 子粒产量(kg/hm ²) Grain yield | 千粒重(g) 1 000-kernel weight | 穗粒数 Kernel number per ear | 穗数(10 ⁴ 穗/hm ²) Ear number | 收获指数(%) HI |
|------------|-----------------|--|-------------------------------|------------------------------|--|---------------|
| 2010 | N1 | 9 423.1 b | 288.7 a | 471.3 a | 8.23 a | 48.0 a |
| | N2 | 10 600.2 a | 290.5 a | 487.8 a | 8.37 a | 49.1 a |
| | N3 | 11 229.1 a | 295.4 a | 501.7 a | 8.23 a | 49.7 a |
| 2011 | N1 | 9 527.3 b | 292.1 b | 466.0 a | 8.35 a | 52.3 a |
| | N2 | 10 874.2 a | 298.0 a | 485.3 a | 8.41 a | 55.3 a |
| | N3 | 11 888.8 a | 305.9 a | 497.5 a | 8.36 a | 53.4 a |

注:数值后不同字母表示差异达5%显著水平。下表同。

Note: Value followed by different letters means significant difference at 5% level. The same below.

12.4%、19.2%;2011年花后追施氮肥(N2和N3)后产量分别增加14.1%、24.8%。处理N3和N2之间差异不显著,但是N3处理产量均比N2处理有所提高,2010年、2011年N3处理产量较N2处理分别提高5.9%和9.3%。吐丝后追施氮肥后千粒重和穗粒数有增加的趋势,但是N2、N3处理之间差异不显著。花后追施氮肥处理春玉米的收获指数(HI)有提高趋势,不同处理间(N1-N3)的HI无显著性差异,这表明追氮后子粒产量的提高主要受益于地上部生物量的增加。

在产量构成中,花后追施氮肥能提高春玉米千粒重,其中2011年N2、N3比N1处理的千粒重分别增加了5.9 g、13.8 g,达到差异性水平($P<0.05$);而且N2、N3处理穗粒数也有增加趋势,说明花后追施氮肥有利于提高春玉米的结实率,增加穗粒数。

2.2 花后施氮对玉米地上部干物质积累及子粒积累动态的影响

由图1可知,各处理地上部生物量在吐丝后的0~7 d内增加迅速但差异并不明显($P<0.05$),从第7 d开始N2、N3处理的生物量开始显著高于N1

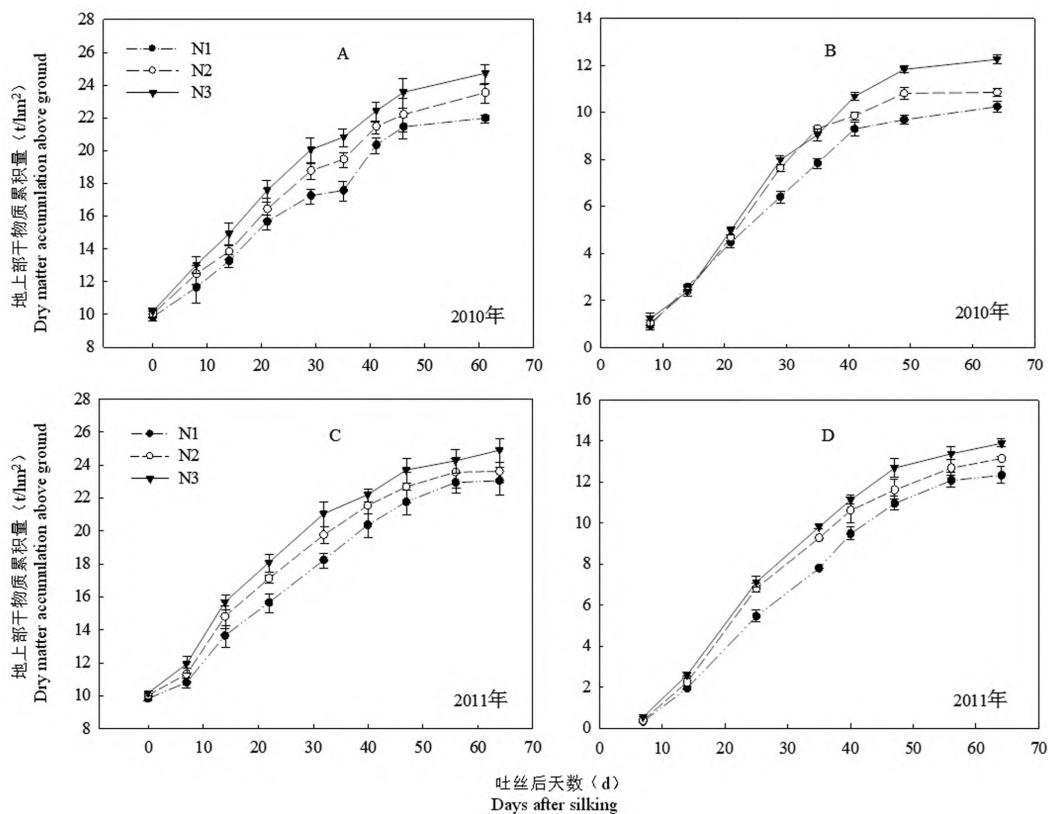


图1 不同处理间地上部生物量(A、C)和子粒生物量(B、D)的动态变化

Fig.1 Dynamics of aboveground biomass(A, C) and grain biomass(B, D) during different treatments

处理,而且这种快速的累积速率持续到了吐丝后的29 d。由图1还可以看出,在吐丝后的前14 d内子粒的干物质量并没有显著差异,而从14 d后不同处理的子粒干物质量累积速率开始出现差异,到吐丝29~35 d后,N3、N2处理子粒干物质量与N1处理相比达到显著差异。说明R1期追肥促进了地上部生物量的累积,为N2、N3处理的高灌浆速率提供了物质基础。从吐丝35~41 d左右,地上部和子粒生物量出现了第二个迅速累积阶段,N3处理的子粒干物质量开始高于N2处理。在第41天后3个处理的地上部和子粒生物量累积速率变缓,而到第59天后

N1处理基本停止累积。说明随着追氮量的增加,维持高灌浆速率的时间也较长,从而保证更多的光合产物向子粒中运输。

2.3 花后施肥对玉米叶面积及叶片功能的影响

从图2中可以看出,2010年不同处理的LAI在吐丝后0~44 d内没有显著性差异,N3>N2>N1;N3处理在吐丝期65 d后仍保持较高的LAI,与N1、N2处理相比差异显著($P<0.05$)。2011年在春玉米吐丝后14 d N3处理的LAI开始高于N1、N2处理,在21 d左右达到显著性差异水平($P<0.05$),而且差异一直持续到吐丝后65 d。

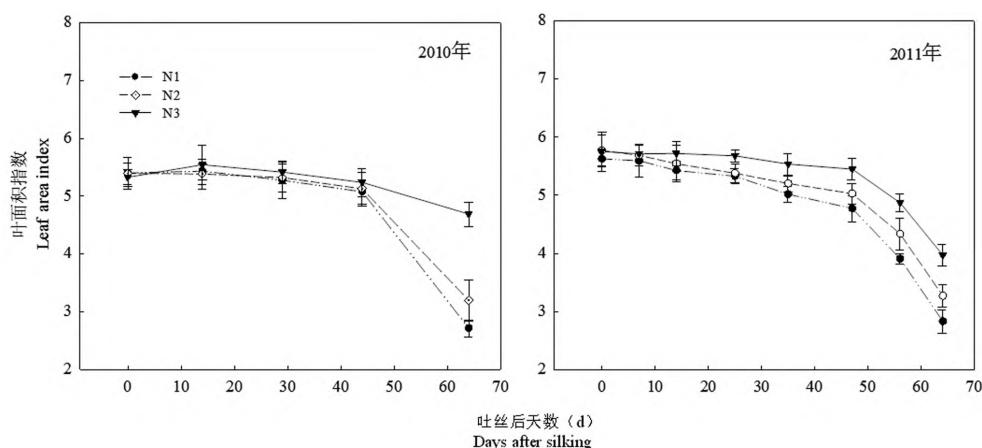


图2 不同处理春玉米叶面积指数(LAI)动态变化

Fig.2 Dynamics of LAI for spring maize in different treatments

这表明R1期、R2期两次追施氮肥能够在一定程度上提高玉米花后LAI,并且高氮处理在成熟后期仍具有较好的持绿性,能够使春玉米在后期仍保持较好的冠层,有利于叶片截获更多的有效光合辐射。

由图3可以看出,春玉米穗位叶的光合速率(P_n)随着生育期的推进整体呈逐渐下降趋势,但是可以通过追施氮肥调控玉米花后穗位叶的光合速率。在

R1期追施氮肥10 d后测定穗位叶光合速率发现,施氮后光合速率有一定的提高,而且在高施氮量下穗位叶光合速率显著大于不施氮处理。在R1期20 d后,各处理间穗位叶光合速率无明显差异,而且较前期明显下降;在R2期追施氮肥后,在吐丝期后30 d穗位叶光合速率发现,与不追施氮肥处理相比,N2、N3处理穗位叶光合速率分别提高15.1%和21.8%,而且N3处理要显著高于N2和N1处理。说明花后

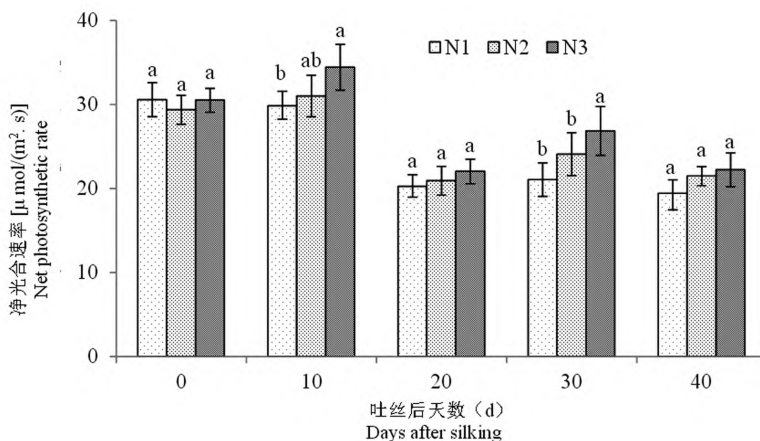


图3 不同处理对玉米穗位叶片光合速率(P_n)的影响(2010)

Fig.3 Photosynthetic rate(P_n) of maize ear lobe for different treatments

两次追施氮肥,能够提高春玉米花后的光合速率(P_n),提高花后干物质生产能力。

从图4可以看出,花后玉米穗三叶的SPAD经历了先上升然后下降的过程,而且在变化过程中受到

氮肥施用的影响。与不追肥处理相比,R1期追施氮肥后穗三叶的SPAD有增加趋势,但是差异不明显($P \leq 0.05$)。在R2期追施氮肥后N2和N3处理显著($P \leq 0.05$)提高了穗位叶和穗下叶的SPAD,穗上叶的

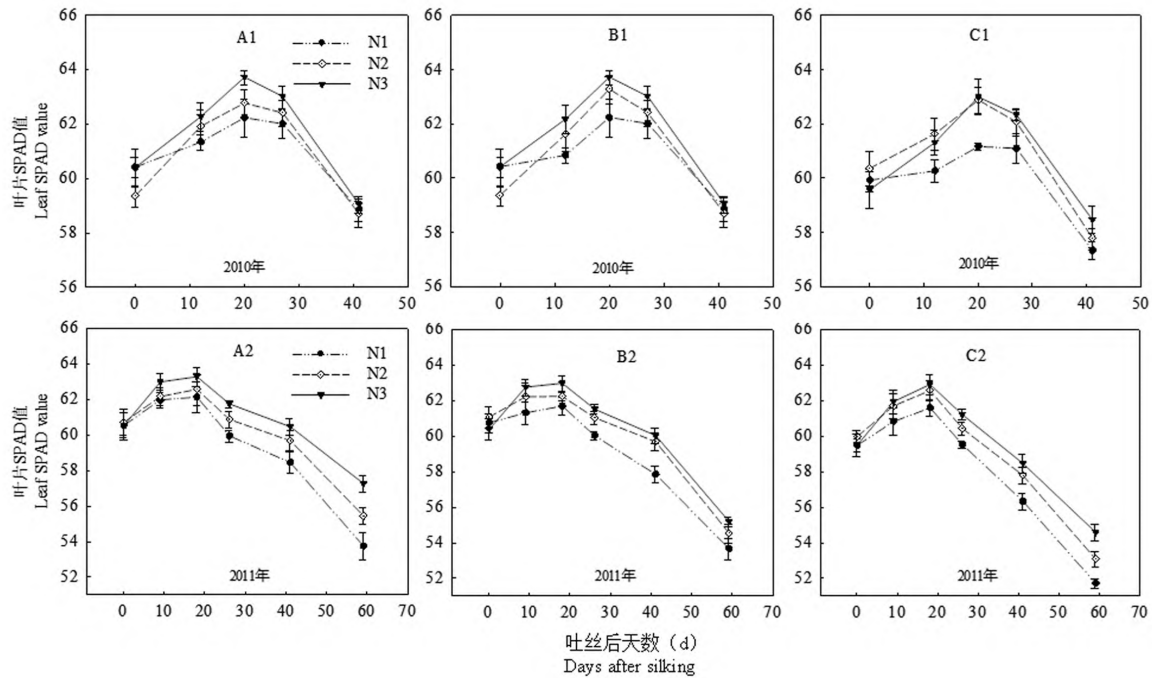


图4 花后施肥处理对穗上叶(A)、穗位叶(B)和穗下叶(C)的SPAD的动态影响

Fig.4 Dynamic variation of SPAD value in ear leaf of different treatments

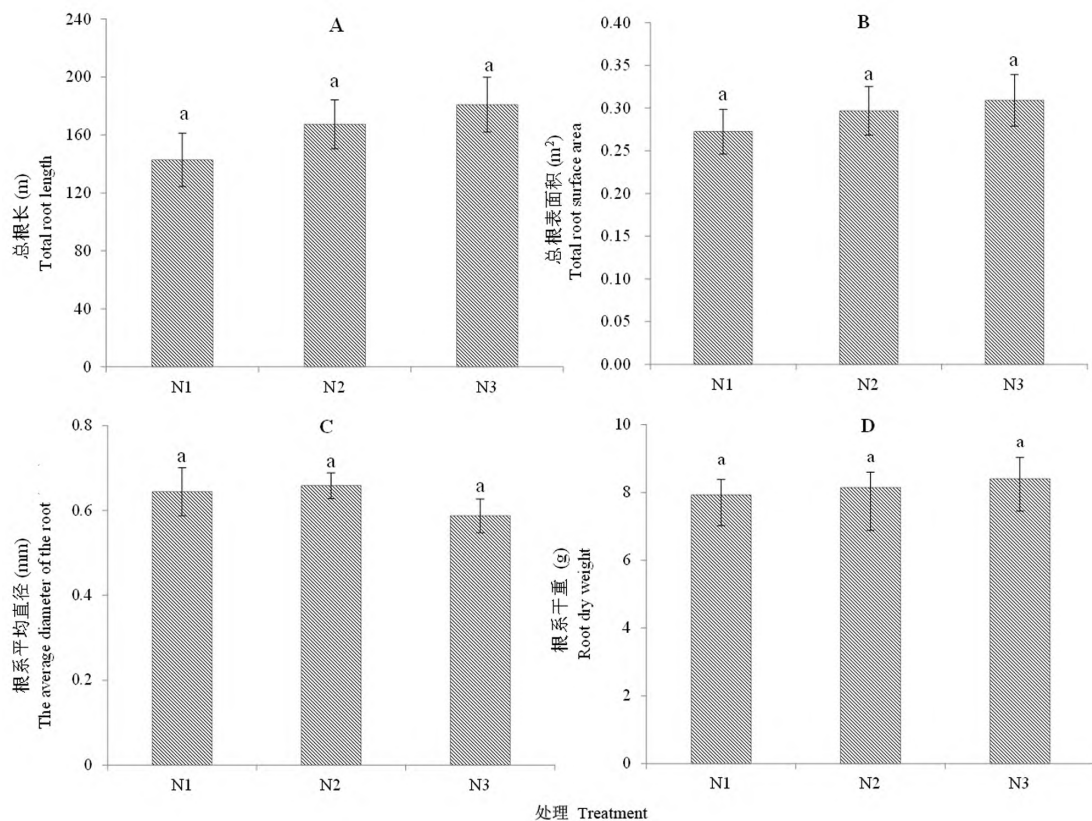


图5 不同处理间根系的总根长(A)、总表面积(B)、平均直径(C)以及根干重(D)(2010)

Fig.5 Effect of treatments on total root length(A), total root surface area(B), root dry weight(C) and the average diameter(D) of the root

SPAD 差异不显著($P \leq 0.05$)。可见,在 R2 期追施氮肥能够提高春玉米穗位叶和穗下叶的叶绿素含量,从而延缓叶片衰老,维持较强的光合能力,增加干物质累积,提高产量。

2.4 不同处理对根系的影响

花后追施氮肥在一定程度上增加了根系的总根长、总根表面积和根干重,根系平均直径有一定下降。从图 5 可以看出,N2、N3 处理根系的总根长分别比 N1 处理提高了 17.2% 和 26%;总根表面积分别提高了 11.1% 和 16.7%;根干重分别提高了 2.7% 和 5.9%。随着施氮量的提高,根系的总根长、总根表面积和根干重都有递增的趋势,统计检验并不显著

($P \leq 0.05$)。

各处理的根平均直径虽然呈减小趋势,但差异不显著,基本稳定在 0.6 mm 左右。进一步对各土层根长、根表面积和根直径分析发现,各处理之间各个根层的平均根直径无显著差异,但是花后追施氮肥能够提高后期 10~20 cm 和 50~60 cm 根层的根长和根表面积。

从图 6 可以看出,N3 处理的根系长度在 10~20 cm 和 50~60 cm 层与 N1、N2 处理相比差异显著($P < 0.05$),在 10~20 cm 根层的根表面积 N3 处理明显大于其他处理,在 50~60 cm 根层 N2、N3 处理的根表面积显著大于 N1 处理。

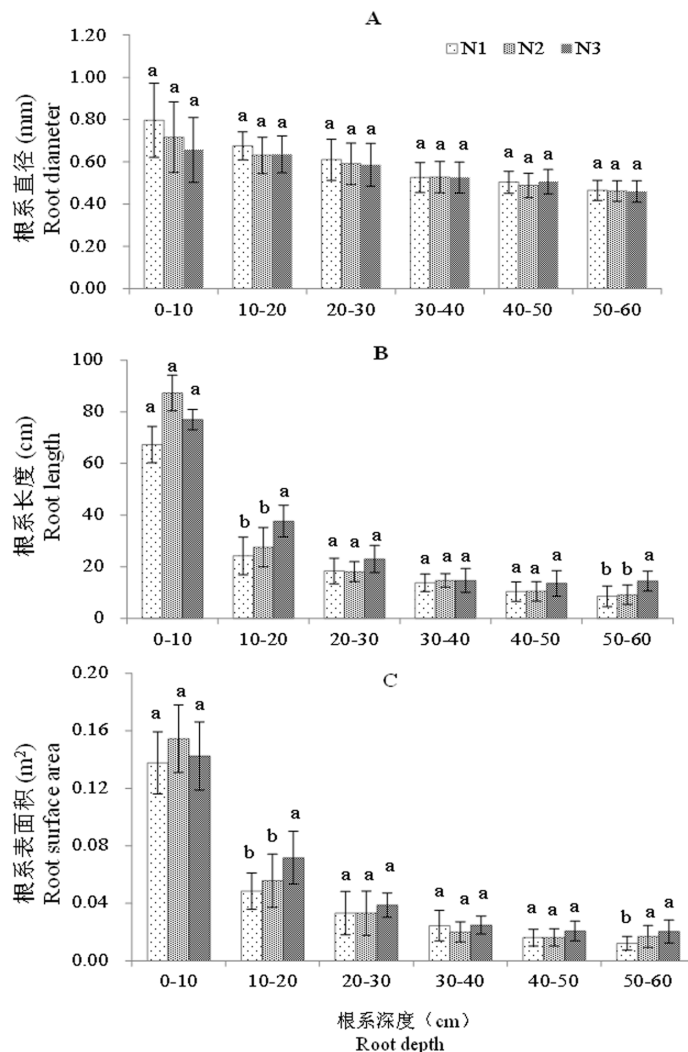


图6 不同处理间根系形态在土壤中的垂直分布(2010)

Fig.6 Effect of treatments on root morphology distribution in soil profile

3 结论与讨论

根据 INM 调控方案,在春玉米 R1、R2 期进行最优施氮(N2)及在 N2 基础上提高 50% 施氮量

(N3),促进了春玉米地上部生物量的累积,为花后春玉米的高灌浆速率提供了物质基础,而且,春玉米维持高灌浆速率的时间有所延长,使得更多的光合产物向子粒中转移,从而使 N2、N3 处理春玉米产量

较对照分别增加 12.4%、19.2% (2010 年) 和 14.1%、24.8% (2011 年)。说明在春玉米在 INM 调控方案下, 通过后期氮素精准调控还有进一步提高产量的空间。

作物要获得高产, 良好的根系形态是重要条件之一。根系形态特征(包括根长、半径、侧根数量、密度及根毛长度等因子) 在决定养分和水分吸收效率方面具有重要作用^[17]。本研究发现, 在 R1、R2 期随着追氮量的增加, 玉米总根系的根重也相应增加, 另外追氮使 0~60 cm 土层单株根系的总根长、根表面积均有所增加, 而平均根直径有所减小。Aboulroos 等^[18]用 3 个施氮量(60、90、120 kg/hm²) 处理温室盆栽的 60 日龄玉米, 发现 30~90 d 后根长和根面积随施氮量增加而增加。本研究还发现, 追氮显著增加了根系在 10~20 cm 和 50~60 cm 土层的根长和根表面积, 根的直径有减小趋势。与王启现^[19]认为基施和吐丝期追氮使根半径减小而根表面积增加不太一致, 可能与前期的管理及肥料用量不同有关。

作物地上部与根系是一个相互依赖、相互作用的统一体, 根系的生长发育状况影响着地上部的生长发育^[20]。在 R1、R2 时期两次追施氮肥, 能适当提高春玉米的 LAI, 而且随着施氮量的提高, 3 个处理的 LAI 依次增大, 特别是高氮处理(N3)在玉米整个花后生育过程中保持较高的 LAI, 从而保证了在生育中后期玉米群体具有良好的冠层, 获得更多的有效光合辐射。王顺霞等^[21]也认为, 在玉米生长后期, 需提高 LAI, 防止玉米早衰, 增加穗重, 进而提高玉米产量。叶片叶绿素含量的消长规律是反映叶片生理活性的重要指标之一, 与光合作用的强弱和产量关系密切^[22]。本研究表明, 在花后两次追施氮肥能提高功能叶的 SPAD, 特别是 R2 期追氮能显著提高玉米穗位叶和穗下叶的 SPAD 值, 而且在整个生育中后期 3 个处理穗三叶的 SPAD 均表现为 N3>N2>N1。说明两次追肥提高了穗三叶的生理活性, 延缓了在后期的衰老。

很多研究认为, 玉米中部叶片尤其是穗三叶(穗位叶和结实雌穗上下节的叶片)对玉米干物质的积累非常重要^[23~26]。白永新^[27]、唐海涛^[28]等认为, 穗三叶中以穗位叶的光合性状对产量的影响最大。本试验对不同处理穗位叶光合速率的研究发现, 后期追施氮能够提高穗位叶的光合速率, 从而提高了花后干物质生产能力, 提高产量。研究表明, 从吐丝前 12 d 的雌穗分化期至吐丝期后 17 d 的子粒灌浆初期的高光合速率对于提高玉米子粒的结实率具有重要的作用^[29]。试验中 R1 期的追肥提高了吐丝后的光

合速率, 从而提高了 N2、N3 处理的结实率, 提高了穗粒数, 实现产量增加。另外两次追氮使得春玉米在生育后期有效延缓了光合速率(P_n)的下降, 使得春玉米能生产更多的光合产物, 实现产量增加。

结合以上分析说明, 在 R1、R2 时期两次精准追施氮肥延缓了春玉米根系的衰老, 保证了春玉米中后期对养分的需求, 进而促进了春玉米生长中后期的生长发育, 使群体保持较高的叶面积指数, 叶片维持较长的功能期, 功能叶的光合性能提高、生理活性延长, 干物质积累增加, 最终实现产量增加。

参考文献:

- [1] CHEN X P, CUI Z L, VITOUSEK P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108: 6399-6404.
- [2] 陈传永, 侯海鹏, 李强, 等. 种植密度对不同玉米品种叶片光合特性与碳、氮变化的影响[J]. 作物学报, 2010(5): 871-878.
CHEN C Y, HOU H P, LI Q, et al. Effects of planting density on photosynthetic characteristics and changes of carbon and nitrogen in leaf of different corn hybrids[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(5): 871-878. (in Chinese)
- [3] 陈国平, 王荣焕, 赵久然. 玉米高产田的产量结构模式及关键因素分析[J]. 玉米科学, 2009, 17(4): 89-93.
CHEN G P, WANG R H, ZHAO J R. Analysis on yield structural model and key factors of maize high-yield plots[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(4): 89-93. (in Chinese)
- [4] JUDITH N, ADRIEN N D, MARTIN H C, et al. Variations in corn yield and nitrogen uptake in relation to soil attributes and nitrogen availability indices[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2009, 73: 317-327.
- [5] MOSISA W, MARIANNE B, GUNDA S, et al. Nitrogen uptake and utilization in contrasting nitrogen efficient tropical maize hybrids[J]. Crop Sci., 2007, 47: 519-528.
- [6] 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 Breed, 2002, 121: 480-486.
- [7] 孙占祥, 邹晓锦, 张鑫, 等. 施氮量对玉米产量和氮素利用效率及土壤硝态氮累积的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 119-123.
SUN Z X, ZOU X J, ZHANG X, et al. Effects of maize yield and N application on N utilization and content of soil nitrate[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 18. (in Chinese)
- [8] 马兴林, 王庆祥, 钱成明, 等. 不同施氮量玉米超高产群体特征研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(4): 158-162.
MA X L, WANG Q X, QIAN C M, et al. Canopy characteristics of super-high yielding maize under different nitrogen application[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 158-162. (in Chinese)
- [9] 黄智鸿, 王思远, 包岩, 等. 超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(3): 95-98.
HUANG Z H, WANG S Y, BAO Y, et al. Studies on dry matter accumulation and distributive characteristic in super high-yield maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(3): 95-98. (in Chinese)

- [10] 王宜伦,李潮海,谭金芳,等. 超高产夏玉米植株氮素积累特征及一次性施肥效果研究[J]. 中国农业科学, 2010(15): 3151-3158.
- WANG Y L, LI C H, TAN J F, et al. Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010(15): 3151-3158. (in Chinese)
- [11] 杨国航,崔彦宏,刘树欣. 供氮时期对玉米干物质积累、分配和转移的影响[J]. 玉米科学, 2004, 12(增刊): 104-106.
- YANG G H, CUI Y H, LIU S X. Effect of different stages of fertilizing nitrogen on accumulation, distribution and transfer of maize dry matter[J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(S2): 104-106. (in Chinese)
- [12] SUBEDI K D, MA B L. Nitrogen uptake and partitioning in stay-green and leafy maize hybrids[J]. Crop Science, 2005, 45: 740-747.
- [13] 赵士诚,裴雪霞,何 萍,等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2010, 16(2): 492-497.
- ZHAO S C, PEI X X, HE P, et al. Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 492-497. (in Chinese)
- [14] 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. Studies on plant nitrogen accumulation characteristics and the effect of single application of base fertilizer on super-high-yield summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(2): 339-347. (in Chinese)
- [15] MENG Q F, CHEN X P, ZHANG F S, et al. In-season root-zone nitrogen management strategies for improving nitrogen use efficiency in high-yielding maize production in China[J]. Pedosphere, 2012, 22(3): 294-303.
- [16] Chen X, Zhang F, Römhild V, et al. Synchronizing N Supply from Soil and Fertilizer and N Demand of Winter Wheat by an Improved Nmin Method[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2006, 74(2): 91-98.
- [17] Sattelmacher B, Horst W J, Becker H C. Factors that contribute to genetic variation for nutrient efficiency of crop plants [J]. Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde, 1994, 157: 215-224.
- [18] ABOULROOS S A, HOLAH S S, HAGAG A A. Effect of nitrogen and soil moisture on root growth and nutrients influx by corn[J]. Egyptian Journal of Soil Science, 1992, 32(4): 483-496.
- [19] 王启现,王 璞,杨相勇,等. 不同施氮时期对玉米根系分布及其活性的影响[J]. 中国农业科学, 2003(12): 1469-1475.
- WANG Q X, WANG P, YANG X Y, et al. Effects of nitrogen application time on root distribution and its activity in maize (*Zea mays* L.) [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003(12): 1469-1475. (in Chinese)
- [20] LIEDGENS M, RICHNER W. Relation between maize (*Zea mays* L.) leaf area and root density observed with minirhizotrons[J]. European Journal of Agronomy, 2001, 15: 131-141.
- [21] 王顺霞,王占军,左 忠,等. 不同覆盖方式对旱地玉米田土壤环境及玉米产量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004(S3): 134-137.
- WANG S X, WANG Z J, ZUO Z, et al. Effects of difference mulching on the soil environment and maize yield in rain fed land[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2004(S3): 134-137. (in Chinese)
- [22] 郑丕尧,蒋钟怀,王经武. 夏播“京早7号”玉米叶片叶绿素含量消长规律的研究[J]. 华北农学报, 1988(1): 21-27.
- ZHENG P Y, JIANG Z H, WANG J W. Studies on the changing rule of chlorophyll contents in individual leaf blades of summer maize Jing-zao[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1988(1): 21-27. (in Chinese)
- [23] 崔俊明,张进忠,刘智萍,等. 玉米果穗结构经济性状的基因效应分析[J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 15-18.
- CUI J M, ZHANG J Z, LIU Z P, et al. The gene effect analysis of the economic structural characters of ear on maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(2): 15-18. (in Chinese)
- [24] 赵可夫. 玉米抽雄后不同叶位叶对子粒产量的影响及其光合性能[J]. 作物学报, 1981(4): 259-266.
- ZHAO K F. Effect of the leaves of different positions in maize on the corn yield and the photosynthetic properties of those leaves after the growing out of the female flowers[J]. Acta Agronomica Sinica, 1981(4): 259-266. (in Chinese)
- [25] 魏国才,姜 军,南元涛,等. 玉米不同层次叶片与单株产量的关系及实践意义研究[J]. 黑龙江农业科学, 2000(1): 16-17.
- WEI G C, JIANG J, NAN Y T, et al. Studies on the relationship between different course of leaves and single plant yield on maize[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2000(1): 16-17. (in Chinese)
- [26] 唐海涛,张 彪,谭 君,等. 玉米杂交种产量性状与穗位叶光合性状关联度分析[J]. 中国农学通报, 2011(1): 69-73.
- TANG H T, ZHANG B, TAN J, et al. Grey correlation degree analysis on yield and photosynthetic characteristics of ear leaf on hybrids of corn[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011(1): 69-73. (in Chinese)
- [27] 白永新,王早荣,钟改荣,等. 玉米高配合力亲本自交系、杂交种棒三叶的性状分析及叶面积的相关性研究[J]. 玉米科学, 1999, 7(2): 25-27.
- BAI Y X, WANG Z R, ZHONG G R, et al. Analysis on characters of three ear leaves of parents of high combining ability and hybrids of corn and correlative research of leaf area[J]. Journal of Maize Sciences, 1999, 7(2): 25-27. (in Chinese)
- [28] 唐海涛,张 彪,田玉秀,等. 玉米杂交种棒三叶光合性状比较研究[J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 86-90.
- TANG H T, ZHANG B, TIAN Y X, et al. Comparison of photosynthetic characteristics of three ear-leaves hybrids maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(2): 86-90. (in Chinese)
- [29] 赵久然,郭景伦,郭 强,等. 乙烯类药剂处理对玉米果穗发育及穗粒数的影响[J]. 北京农业科学, 1998(4): 2-4.
- ZHAO J R, GUO J L, GUO Q, et al. The effect of ethane on the ear development and grain number[J]. Beijing Agricultural Sciences, 1998(4): 2-4. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)