

不同水氮管理下玉米叶片衰老对氮转移效率的影响

张忠学^{1,2} 尚文彬^{1,2} 齐智娟^{1,2} 郑恩楠^{1,2} 刘 明^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为阐明不同水氮管理模式下玉米叶片衰老过程对玉米中氮素转移的影响,进行了大田试验,通过设置3个灌溉水平(150、300、450 m³/hm²)和4个施氮水平(0、180、220、260 kg/hm²),探究不同水氮组合下玉米叶片衰老启动时间、叶片衰老速率、最大绿叶衰减速率出现时间及叶片衰老过程对叶片氮转移效率和籽粒灌浆过程的影响。结果表明:各处理叶片衰老启动时间均发生在吐丝后10 d左右,其受灌水和施氮影响较小;在灌水充足条件下,增加施氮量可以降低叶片衰老速率,延长最大绿叶衰减速率出现时间;施氮量相同时,随灌水量增加吐丝期叶片氮素积累量呈先增加、后减小的趋势;在一定范围内,叶片氮转移效率随最大绿叶衰减速率出现时间的增加而提高,最高可提升25.78个百分点;籽粒灌浆速率呈先慢后快、最后趋于平缓的变化规律,且在吐丝后30~40 d达到最大,延缓叶片衰老速率有助于提高百粒质量;当灌水量为300 m³/hm²、施氮量为260 kg/hm²时,最大绿叶衰减速率出现时间为吐丝后48.90 d,叶片氮转移效率最高,百粒质量最大,是最佳灌水、施氮组合。

关键词: 玉米; 水氮管理; 氮素转移; Logistic 方程

中图分类号: S513; S143.1*4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0297-07

Effects of Different Water and Nitrogen Managements on Nitrogen Remobilization Efficiency during Leaf Senescence in Maize

ZHANG Zhongxue^{1,2} SHANG Wenbin^{1,2} QI Zhijuan^{1,2} ZHENG Ennan^{1,2} LIU Ming^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Field experiments were conducted to study the effects of different water and nitrogen managements on nitrogen remobilization efficiency during maize leaf senescence process. The experiment included three irrigation levels (150 m³/hm², 300 m³/hm² and 450 m³/hm²) and four nitrogen application levels (0 kg/hm², 180 kg/hm², 220 kg/hm² and 260 kg/hm²). The date of onset of leaf senescence, maximum rate of decrease in relative green leaf area, mean rate of decrease in relative green leaf area and the day of maximum rate of decrease in relative green leaf area under different water and nitrogen conditions were analyzed. The effects of nitrogen remobilization efficiency and grain filling process during leaf senescence process were also studied. The results showed that the date of onset of leaf senescence under each treatment occurred about 10 days after silking, and it was less affected by irrigation and nitrogen application. Under sufficient irrigation conditions, increasing nitrogen application could reduce maximum rate of decrease in relative green leaf area and prolong the day of maximum rate of decrease in relative green leaf area. With the same amount of nitrogen application, leaf nitrogen accumulation was increased first and then decreased with the increase of irrigation at silking stage. Within a certain range, leaf nitrogen remobilization efficiency was increased with the continuous increase of the day of maximum rate of decrease in relative green leaf area, and the maximum increment was 25.78 percentage points. The grain filling rate was slow first, and then fast, and eventually tended to change smoothly. The grain filling rate reached the maximum value after 30~40 days of silking. Delaying leaf senescence rate was helpful to improve 100-grain quality. When the amount of irrigation was 300 m³/hm²

收稿日期: 2019-04-16 修回日期: 2019-04-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51809042)

作者简介: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

通信作者: 齐智娟(1987—),女,讲师,博士后,主要从事农业节水灌溉和土壤水肥高效利用研究,E-mail: zhijuanqi@neau.edu.cn

and the nitrogen amount applied was 260 kg/hm², the day of maximum rate of decrease in relative green leaf area occurred at 48.90 days after silking and both leaf nitrogen remobilization efficiency and 100-grain quality were the highest.

Key words: maize; water and nitrogen management; nitrogen remobilization; Logistic model

0 引言

玉米是我国重要的粮食作物之一,截止 2016 年,玉米的播种面积及产量占粮食作物的比例分别达到了 32.53% 和 35.63%。施用氮肥是促进玉米增产的重要措施^[1-2],然而,过量施用氮肥不仅达不到增产的效果还会造成诸如温室气体排放、农田土壤酸化、淡水资源退化等环境问题^[3-5]。为保障粮食安全和农业可持续发展,减少氮肥损失、提高氮肥利用率具有重要意义。

施入的氮肥主要流向土壤、作物、大气 3 个系统中^[6-7]。其中,氮素在作物体系内的转移直接影响着作物产量及氮肥利用率。相关研究表明:玉米籽粒含氮量的 60%~70% 源自开花前氮的再转移^[8],灌浆后玉米叶中氮对籽粒的贡献最高可达 90%^[9]。因此,提高作物同化产物的累积量和花后叶片氮转运量是获得玉米高产的关键。作物同化产物的积累源自于叶片对光能截获和利用,关于提升作物同化产物累积量已有大量报道。刘洋等^[10]研究表明,覆膜处理可以促进玉米生育前期叶片生长,增强光合作用,使成熟期玉米干物质量和氮素含量较不覆膜处理提高 9%~22% 和 12%~27%。张富仓等^[11]通过 2 年试验得出,适当提升春玉米施肥量可以明显增加叶面积指数和地上部分干物质累积量。进入生育后期叶片逐渐衰老,光合作用减弱,植株同化产物量减少。与叶片衰老同时进行的是籽粒灌浆,籽粒灌浆的速度和时间直接决定玉米品质与产量^[12]。

目前关于玉米叶片衰老的研究多集中于不同种植密度^[13]、不同品种^[14]等方面,且多数为叶片衰老的生理机制探究,而在覆膜不同水氮管理模式下玉米叶片衰老过程对籽粒灌浆速率的影响及叶片衰老过程与氮素转移效率间的关系尚不明确。基于此,本文以玉米为研究对象,应用 Logistic 模型描述叶片衰老的动态过程,并结合花后叶片氮素积累量和比叶重等指标,探究叶片衰老过程对玉米中氮素转移效率的影响。通过合理的水肥调控延缓叶片衰老时间,提高叶片氮转移效率,进而达到高产、高效、节水、节肥的目的。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年在黑龙江省肇州县水利科学试

验站(45°17'N,125°35'E)进行,该站位于黑龙江省西南部,属典型的旱作物试验区,主要进行玉米、大豆等旱田作物的试验研究。平均海拔 150 m,属于大陆性温寒带气候,大于等于 10℃ 有效积温 2 845℃,无霜期 138 d,属于第一积温带,地下水深度在 7 m 左右。多年生育期平均降雨量约为 390 mm,平均蒸发量 1 733 mm。试验土壤为碳酸盐黑钙土(土壤物理性质),容重 1.21 g/cm³。土壤基础肥力:有机质质量比 28.20 g/kg、全氮质量比 1.41 g/kg、全磷质量比 0.88 g/kg、全钾质量比 19.86 g/kg、碱解氮质量比 0.13 g/kg、速效磷质量比 0.04 g/kg、速效钾质量比 0.21 g/kg。

1.2 试验设计

试验采用灌水量和施氮量 2 因素试验。灌水量设置 3 个水平,W1(150 m³/hm²)、W2(300 m³/hm²)、W3(450 m³/hm²),施氮量设置 4 个水平,N0(不施氮)、N1(180 kg/hm²)、N2(220 kg/hm²)、N3(260 kg/hm²),12 个处理,每个处理重复 3 次,共计 36 个处理小区。小区采用随机区组布置,每个小区面积 62.4 m²(8 m×7.8 m)。采用大垄双行种植,垄宽 130 cm,垄上行距 40 cm,株距 23 cm,种植密度为 67 500 株/hm²。整个试验小区设置保护区和保护行,各小区之间设置隔离带。保护区宽度为 5 m,保护行宽度为 1 m,隔离带宽度为 1.5 m。试验于 2018 年 4 月 27 日施基肥,5 月 2 日播种,供试玉米品种为“稷秠 108”,为当地高产品种。播种后覆膜前在土壤表面喷洒除草剂灭草。覆膜的同时铺设滴灌带,滴灌带为内镶片式,滴头间距 20 cm,滴头工作压力 0.1 MPa,滴头流量 2 L/h,每条滴灌带控制 2 行玉米。播种后 5 d 进行保苗灌水。生育期内共灌水 2 次,分别在拔节期及灌浆期灌水,每次灌水定额比例为 1:1。磷肥和钾肥作为基肥施入(磷肥、钾肥的施用量均为 90 kg/hm²),氮肥 40% 作为基肥施入,60% 作为追肥于拔节期与灌浆期随灌水按 1:1 施入。试验所选用的氮肥为尿素(含 N 质量分数 46%),磷肥为磷酸二铵(含 N 质量分数 18%,P₂O₅ 质量分数 46%),钾肥为硫酸钾(含 K₂O 质量分数 54%)。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶面积

每个小区选取吐丝期长势一致的玉米标记,从

吐丝期开始每隔 10 d 选取被标记玉米中的 3 株,测量其每片叶的叶长及叶宽,计算玉米叶面积(0.75 乘叶长再乘叶宽),共计测量 6 次(即吐丝后 50 d)。

1.3.2 叶片、籽粒含氮量

在测量叶面积同时取植株叶片及籽粒置于 105℃ 干燥箱中杀青 30 min,而后在 65℃ 条件下干燥至恒质量并称量。将称量后的样品各部分混匀并进行研磨,过 0.15 mm 筛后装入样品袋中密封保存。植株全氮含量采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消解,AA3 型连续流动分析仪(Seal Analytical GmbH,德国,灵敏度 0.001 AUFS)测定。

1.4 叶片衰老过程拟合

采用 Logistic 方程对叶片衰老过程进行拟合,其函数形式为

$$y = ae^{b-cx} / (1 + e^{b-cx}) \times 100\% \tag{1}$$

式中 y——某一时刻相对绿叶面积, %

x——吐丝后时间, d

a、b、c——大于 0 的待定参数

其中参数 a 为拟合方程的理论初始值(根据文献[13]在拟合时设置为 1)。b 与叶片衰老启动时间相关,c 与叶片衰老的速度相关。根据张仁和等[13]的方法可以求出叶面积最大衰老速率 V_{max} 及最大绿叶衰减速率出现时间(吐丝后天数) T_{max}, 分别为

$$V_{max} = c/4 \times 100\% \tag{2}$$

$$T_{max} = b/c \tag{3}$$

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 对数据进行初步整

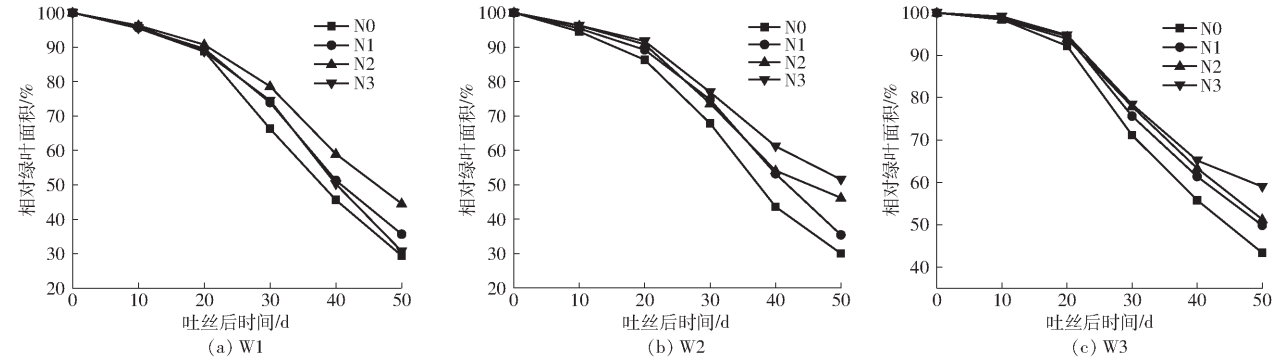


图 1 不同处理下玉米相对绿叶面积动态变化曲线

Fig.1 Dynamic changing curves of relative green leaf area of maize under different treatments

2.2 玉米叶片衰老参数

水氮耦合下玉米相对绿叶面积动态变化采用 Logistic 方程进行拟合,所得方程参数如表 1 所示。由表 1 可知,各处理拟合方程相关系数 R 均不小于 0.927 9,拟合效果较好,表明可以采用 Logistic 方程模拟玉米叶片衰老的动态过程。叶片衰老启动时间 T_s、平均衰老速率 V_m、最大衰老速率 V_{max} 及最大绿叶衰减速率出现时间 T_{max} 如表 1 所示。其中叶片衰老

理,使用 SPSS 16.0 统计分析数据,LSD 法进行显著性检验(显著水平为 P < 0.05),Origin 9.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 玉米吐丝后相对绿叶面积变化

相对绿叶面积(Relative green leaf area)是指吐丝后某一时刻的叶面积与吐丝期叶面积的比值[14]。图 1 为吐丝后玉米相对绿叶面积动态变化。由图 1 分析知,随生育期的进行,各处理相对绿叶面积均单调递减,且呈“慢—快—慢”的变化趋势。吐丝后 0~10 d、10~20 d、20~30 d、30~40 d、40~50 d 叶片平均衰老速率分别为 0.09%~0.55%、0.41%~0.82%、1.21%~2.25%、1.33%~2.42%、0.62%~1.95%。吐丝后 10、20 d 灌水和施氮对相对绿叶面积影响均不显著(P > 0.05)。吐丝后 30 d 灌水对相对绿叶面积影响不显著(P > 0.05),施氮对相对绿叶面积影响显著(P < 0.05)。吐丝后 40、50 d 灌水和施氮均对相对绿叶面积影响显著(P < 0.05)。施氮量相同时 W3 处理成熟期相对绿叶面积较 W1、W2 处理分别高了 14.99%~91.90%、11.90%~44.40%,表明适度增加灌水可以提高相对绿叶面积。灌水量相同时,施氮可以提高相对绿叶面积,N1、N2、N3 处理成熟期相对绿叶面积分别较 N0 高出 14.95%~21.24%、18.22%~53.93%、4.45%~71.65%。除 W1 条件下 N0、N3 处理差异不显著,其余均达到 P < 0.05 水平。

启动时间 T_s是指相对绿叶面积达到 95% 所需的时间[14]。由表 1 可知,不同处理叶片衰老启动时间为 6.36~10.72 d。除 W1 处理叶片衰老启动时间随施氮量的增加而延后外,其余处理无明显规律。水氮耦合下叶片平均衰老速率、最大衰老速率变化规律一致。灌水量为 W1 时,叶片平均衰老速率、最大衰老速率随施氮量的增加呈先降低后升高趋势,在 N2 处理时达到最低。叶片平均衰老速率和最大衰老速

率分别较 N0、N1、N3 处理降低 21.45%、13.82%、19.97% 和 21.61%、13.48%、15.75%。灌水量为 W2 和 W3 时,叶片平均衰老速率和最大衰老速率随施氮量的增加呈持续下降趋势,在 N3 处理达到最低。灌水量为 W2 时,叶片平均衰老速率和最大衰老速率最高可降低 30.74% 和 26.14%。灌水量为 W3 时,叶片平均衰老速率和最大衰老速率最高可降低 27.56% 和 22.20%。最大绿叶衰减速率出现时间与叶片平均衰老速率、最大衰老速率变化呈相

反趋势。在灌水量为 W1 时随施氮量的增加呈先增加后减小趋势,在 N2 处理时最大绿叶衰减速率出现时间最高可延长 10.90 d。在灌水量为 W2、W3 时随施氮量的增加呈持续增加趋势,在 N3 处理时最大绿叶衰减速率出现时间最高可延长 11.97 d 和 11.20 d。表明水氮处理主要通过影响叶片平均衰老速率、最大衰老速率及最大绿叶衰减速率出现时间进而影响叶片衰老过程,对于叶片衰老启动时间影响不大。

表 1 不同处理下叶片衰老特征参数
Tab.1 Leaf senescence parameters under different treatments

处理	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i>	<i>T_s</i> /d	<i>V_m</i> /%	<i>V_{max}</i> /%	<i>T_{max}</i> /d
W1N0	3.674 7	0.104 3	0.933 7	7.00 ^c	1.411 4 ^a	2.607 5 ^a	35.23 ^d
W1N1	3.763 0	0.094 5	0.940 7	8.66 ^b	1.286 4 ^a	2.362 5 ^a	39.82 ^d
W1N2	3.771 2	0.081 8	0.945 5	10.11 ^a	1.108 6 ^{ab}	2.044 0 ^b	46.13 ^c
W1N3	3.966 4	0.097 0	0.944 6	10.53 ^a	1.385 2 ^a	2.426 0 ^a	40.87 ^{cd}
W2N0	3.574 7	0.096 8	0.927 9	6.51 ^c	1.399 6 ^a	2.420 0 ^a	36.93 ^d
W2N1	3.799 2	0.089 9	0.942 2	9.51 ^{ab}	1.291 4 ^a	2.247 0 ^a	42.27 ^c
W2N2	3.432 7	0.076 7	0.933 5	6.36 ^c	1.075 8 ^b	1.918 3 ^c	44.74 ^c
W2N3	3.496 6	0.071 5	0.938 2	7.72 ^{bc}	0.969 4 ^b	1.787 5 ^d	48.90 ^b
W3N0	3.653 5	0.087 9	0.940 5	8.06 ^b	1.133 0 ^{ab}	2.198 3 ^a	41.55 ^c
W3N1	3.723 2	0.077 5	0.945 4	10.05 ^a	1.003 4 ^b	1.938 0 ^{bc}	48.03 ^b
W3N2	3.767 8	0.076 8	0.947 4	10.72 ^a	0.975 0 ^b	1.920 0 ^c	49.06 ^a
W3N3	3.674 7	0.068 4	0.943 3	9.71 ^a	0.820 8 ^c	1.710 3 ^d	52.75 ^a

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著。

2.3 叶片衰老过程中叶片氮素积累量及比叶重变化

叶片衰老过程中叶片氮素积累量变化如图 2 所示,不同处理叶片氮含量在吐丝期或吐丝后 10 d 达到最大。其中 W1N0、W1N3、W2N0 处理叶片氮含量在吐丝期达到最大,之后呈一直下降趋势,更早地启动了氮转移。吐丝后 20~40 d 叶片氮含量下降速率最快,与相对绿叶面积变化规律一致,说明叶片衰老对叶片氮素转运有一定的影响。施氮可以显著提升玉米吐丝期叶片含氮量,较不施氮处理提高 77.78%~162.44%。生育末期叶片含氮量受吐丝期叶片氮素积累量和吐丝后氮素转运量共同影响。在施氮量为 N1 时,W3 处理叶片氮素转运量分别较 W2 处理和 W1 处理提高 7.52% 和 48.41%;在施氮量为 N2、N3 时,W2 处理叶片氮素转运量较 W3 处理提高 25.55%、36.55%,表明在施氮量较低时灌水有助于提高叶片氮素转运量,而施氮量较高时,灌水反而抑制叶片氮素转运量。

比叶重(Specific leaf weight)指单位叶面积的叶片干质量,与叶片寿命相关^[15]。叶片衰老过程中比叶重变化如图 3 所示,吐丝期开始时不同处理比叶重差异显著,W2N3 处理比叶重最高达到 4.75 mg/cm²,较最低处理 W1N0 提高 39.30% (*P* < 0.05)。吐丝后 10 d 各处理比叶重逐渐降低,且在吐丝后 10~30 d

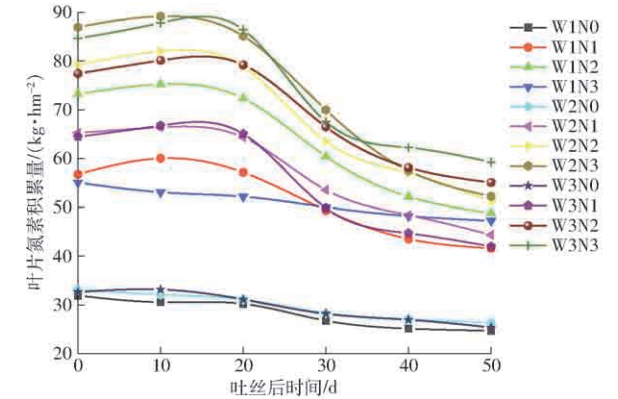


图 2 叶片衰老过程中氮素积累量变化曲线

Fig.2 Changing curves of nitrogen accumulation during leaf senescence process

比叶重下降最快。至成熟期时,不同处理比叶重之间的差距缩小,其他处理成熟期比叶重较最低处理 W1N0 提高 0.63%~13.21%。成熟期不同处理比叶重较吐丝期下降 5.04%~29.06%,其中 W2N2、W2N3 处理比叶重下降高达 28.29%、29.06%,说明其叶片发生更多的物质转运。

2.4 叶片衰老过程对籽粒灌浆的影响

籽粒灌浆速率对籽粒库容的充实程度有影响,百粒质量是构成玉米产量要素之一^[16]。不同处理叶片衰老过程中百粒质量变化如图 4 所示,由图 4

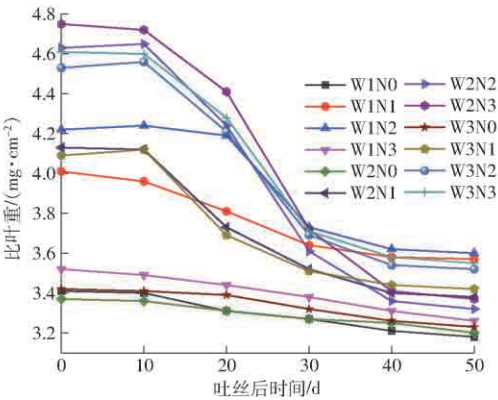


图 3 叶片衰老过程中比叶重变化曲线
Fig. 3 Changing curves of specific leaf weight during leaf senescence process

可知,不同处理玉米籽粒灌浆速率呈单峰曲线变化,最大灌浆速率均出现在吐丝后 30~40 d。在灌浆初期(吐丝后 10~20 d),不同处理百粒质量差异不显著,籽粒灌浆速率较慢,吐丝后 30 d,各处理百粒质量开始出现差异,籽粒灌浆速率增加。其中 W2N3 处理平均籽粒灌浆速率最高达到 2.01 g/d,较其他处理最高可提升 117.15%。灌浆结束后所达到的最大百粒质量受灌水和施氮共同影响。不同灌水条件下,随着施氮量的增加百粒质量呈不同变化趋势。W1 处理下,随着施氮量的增加百粒质量呈先增加后减小趋势,由大到小依次为 N2、N1、N3、N0。其中施氮处理百粒质量均显著高于不施氮处理 ($P < 0.05$),分别较 N0 高 28.69%、18.25%、12.79%。W2、W3 处理下,随着施氮量的增加百粒质量呈持续增加趋势。施氮处理百粒质量较 N0 处理分别高 19.19%、29.73%、37.92% (W2 处理) 和 13.15%、22.80%、28.21% (W3 处理)。在施氮量相同时 (N1~N3),W2 处理百粒质量较 W3 处理提高 1.03%~3.16%。可见,施氮可以显著提升玉米百粒质量,但灌水不足时,过量施氮反而会降低百粒质量。而灌水量过高又会影响氮肥效果,降低百粒质量。

2.5 叶片衰老过程对氮素转运效率的影响

叶片氮素转移是玉米叶片衰老过程中的重要生理过程之一,与籽粒灌浆同时进行,叶片的氮转移效率反映了叶片对籽粒含氮量的贡献率^[17-18]。叶片氮转移效率是指吐丝期与成熟期叶片氮素含量的差值与吐丝期叶片氮素含量的比值^[13]。不同处理下叶片氮转移效率如图 5 (图中不同小写字母表示不同处理叶片氮转移效率在 0.05 水平差异显著) 所示,由图 5 可知,不同处理叶片氮转移效率为 14.15%~39.93%。W1N3 处理氮转移效率最低,仅为 14.15%,表明灌水不足施氮过高时叶片吸收同化的氮素更多用于维持自身生长,向籽粒等生殖

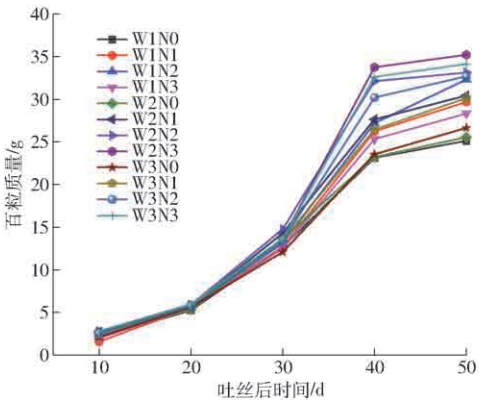


图 4 叶片衰老过程中百粒质量变化曲线
Fig. 4 Changes of 100-grain quality during leaf senescence process

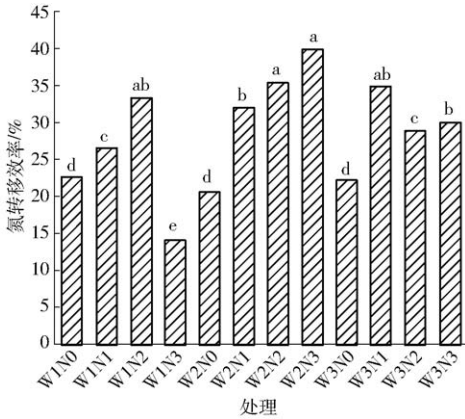


图 5 不同处理叶片氮素转移效率
Fig. 5 Leaf nitrogen remobilization efficiency under different treatments

器官运转较少。在灌水量为 W2、W3 时,施氮处理叶片氮转移效率均显著高于不施氮处理。W2 处理下,施氮量为 N3 时叶片氮转移效率最高,与不施氮相比提高 93.37% ($P < 0.05$),W3 处理下,施氮量为 N1 时叶片氮转移效率最高,与不施氮相比提高 56.26% ($P < 0.05$)。

叶片氮素转运效率与最大绿叶衰减速率出现时间呈显著正相关,相关系数为 0.65,与叶片平均衰老速率呈显著负相关,相关系数为 0.676,与叶片最大衰老速率呈极显著负相关,相关系数为 0.753。叶片氮素转运和叶片快速衰老时期均发生在吐丝 20 d 后,此时叶面积急剧减小会使叶片同化光合产物能力减弱,无法满足自身生长需求,减少向籽粒的氮素转运量。

3 讨论

玉米叶片在玉米生长发育的各个阶段都具有重要作用,是作物进行光合作用的主要场所,为籽粒灌浆提供氮源。叶片衰老是作物生长过程中的常见现象,具有重要的生物学意义^[19]。延缓叶片衰老时间

并提高叶片衰老过程中氮素转运效率可以显著提高作物产量和氮肥利用率。因此,本试验在覆膜水氮管理的条件下探究不同处理叶片衰老的启动时间、叶片衰老速率、最大绿叶衰减速率出现时间及叶片衰老过程对籽粒灌浆速率及氮素转移效率的影响。研究结果表明,不同处理玉米叶片衰老启动时间为 6.36 ~ 10.72 d,受灌水和施氮影响不大。CHEN 等^[14]对不同杂交玉米品种研究表明,不同品种玉米叶片衰老启动时间差异显著,说明玉米叶片衰老启动时间与玉米的基因型有关,而与灌水和施氮等外加条件无关。增加灌水量可以降低玉米叶片衰老速率,延缓最大绿叶衰减速率出现时间,王国栋等^[20]对控墒条件下玉米叶片衰老规律探究,也得到类似的结论。吕丽华等^[21]对不同施氮量下玉米叶片性状研究表明,施氮量超过 180 kg/hm²会使叶片提早衰老。而本研究表明,在灌水量为 W1 时,施氮超过 220 kg/hm²会使叶片提前衰老,在灌水量为 W2、W3 时,增加施氮量可以延缓叶片衰老。其原因可能是本试验玉米种植密度较低,为 67 500 株/hm²,而前者种植密度较高,为 82 500 ~ 125 000 株/hm²。种植密度过高会加剧作物对光照资源的竞争,增加施氮量会使叶片前期长势较好,使冠层内光照条件变差,导致叶片提前衰老。此外,在灌水充足的条件下,适量的施加氮肥既可以保证作物的氮素营养又可以保持作物合理的碳氮比,延缓叶片的衰老^[22]。

叶片衰老过程中,叶片中的蛋白质被降解成谷氨酸、赖氨酸、天冬氨酸等各种氨基酸^[23],产生的氨基酸通过一系列的转氨反应进行作物体内氮的再转移^[17]。本研究表明,吐丝后 20 ~ 40 d,叶片氮素转运量最高,达到 3.93 ~ 27.67 kg/hm²,占总转运量的 50.45% ~ 95.28%,在此期间叶片衰老速率也达到最大。相关性分析也表明叶片氮转移效率与叶片最大衰老速率呈极显著负相关。YANG 等^[24]利用¹⁵N 示踪技术探究玉米叶片氮素转移规律也得出了类似结论。在一定程度上,叶片氮转移效率随着最大绿叶衰减速率出现时间增加而升高,相关系数达到 0.65,呈显著正相关。但最大绿叶衰减速率出现时间过晚反而会造成叶片氮素转运量和氮素转移效率降低。本研究中 W3N2、W3N3 处理最大绿叶衰减速率出现时间最晚分别为吐丝后 49.06 d 和吐丝后 52.75 d。但其叶片氮转运量和氮素转移效率为 22.39、25.42 kg/hm² 和 28.92%、30.04%,与最高氮转运量和氮转移效率处理 W2N3 相比,叶片氮转运量和氮素转移效率分别下降 35.49%、26.76% 和 27.58%、24.78%。过度持绿可能会使更多的氮素残留在叶片中导致叶片氮转运量过低^[18]。本试验

中 W3N2 处理和 W3N3 处理成熟期叶片含氮量分别较高氮转运处理 W2N3 提高 5.42% 和 13.41%。

灌浆期是玉米产量形成的关键时期。提高灌浆结束后籽粒的质量可以提高玉米产量^[25-26]。玉米叶片的衰老与籽粒的形成发生在同一时期。玉米叶片的衰老过程会通过影响玉米籽粒质量等影响玉米产量。国内外许多学者^[27-28]都认为叶片早衰、绿叶面积减小会降低作物产量,需要通过延迟叶片衰老来解决。本试验探究了叶片衰老过程与籽粒灌浆过程间的关系,结果表明,叶片衰老速率与籽粒灌浆速率都呈先慢后快,最后趋于平缓的“S”形曲线变化规律。各处理百粒质量在灌浆开始时相差不大,灌浆结束后差异显著。灌浆结束后百粒质量整体上随最大绿叶衰减速率出现时间延长而提高,生育后期叶片能保持较长的功能期是玉米获得高产的前提。同时,成熟期相对绿叶面积与灌浆结束后百粒质量也具有一定相关性,具体表现为成熟期相对绿叶面积越大百粒质量越大。玉米光合作用主要通过叶片完成,光合特性主要受叶面积影响^[29]。籽粒干物质质量主要源于吐丝后光合同化物积累^[30]。吐丝后 30 d 相对绿叶面积开始急剧减小,叶面积衰减速率快的处理有效光合面积、光合时间都因叶面积的减小而减小,导致光合同化物产物减小、干物质积累量减小,不同处理籽粒百粒质量差异开始显现。

4 结论

(1)在水分不足的条件不施氮或过量施氮都会引起膜下滴灌玉米叶片早衰,而在灌水充分的条件下增加施氮量可以降低叶片衰老速率,延长绿叶面积持续时间从而延缓叶片衰老。与其他处理相比,W3N3 处理叶片衰老速率降低了 34.41%,最大绿叶衰减速率出现时间延长了 17.52 d,成熟期相对绿叶面积最高提升 1.003 倍。

(2)膜下滴灌玉米叶片衰老过程对叶片氮素转移效率和籽粒灌浆速率均有影响。在一定范围内,降低叶片衰老速率、延长绿叶面积持续时间有助于增加叶片氮素转运量,提高叶片氮转移效率和百粒质量。但过度持绿会导致叶片生长旺盛,氮素更多残留在叶片中,不易向籽粒等器官转运,降低籽粒质量。

(3)灌水量为 300 m³/hm²、施氮量为 260 kg/hm² 时,绿叶面积持续时间较长,花前叶片氮素积累量和花后叶片氮转移效率均达到最高,籽粒质量也达到最大,是本试验最佳的灌水和施氮组合。从农业水肥资源高效利用的角度考虑,灌水 300 m³/hm²、施氮 260 kg/hm² 是黑龙江省西部地区玉米灌水、施氮的最佳组合方式。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [2] 孙文涛, 孙占祥, 王聪翔, 等. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 563–568. SUN Wentao, SUN Zhanxiang, WANG Congxiang, et al. Coupling effect of water and fertilizer on corn yield under drip fertigation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(3): 563–568. (in Chinese)
- [3] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3041–3046.
- [4] GILES J. Nitrogen study fertilizes fears of pollution[J]. Nature, 2005, 433(7028): 791.
- [5] CHEN Xinping, CUI Zhenling, FAN Mingsheng, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486–489.
- [6] 张君, 赵沛义, 潘志华, 等. 基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 136–143. ZHANG Jun, ZHAO Peiyi, PAN Zhihua, et al. Determination of input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 136–143. (in Chinese)
- [7] 徐钰, 江丽华, 林海涛, 等. 不同氮肥运筹对玉米产量、效益及土壤硝态氮含量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1196–1199. XU Yu, JIANG Lihua, LIN Haitao, et al. Effects of different nitrogen regulation on maize yield, economic benefit and the content of soil nitrate-N[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1196–1199. (in Chinese)
- [8] GALLAIS A, COQUE M. Genetic variation and selection for nitrogen use efficiency in maize: a synthesis[J]. Maydica, 2005, 50(3–4): 531–547.
- [9] CHEN Y, XIAO C, CHEN X, et al. Characterization of the plant traits contributed to high grain yield and high grain nitrogen concentration in maize[J]. Field Crops Research, 2014, 159(6): 1–9.
- [10] 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 93–104, 135. LIU Yang, LI Yanfeng, LI Jiusheng, et al. Effects of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 93–104, 135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151014&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.014. (in Chinese)
- [11] 张富仓, 严富来, 范兴科, 等. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 111–120. ZHANG Fucang, YAN Fulai, FAN Xingke, et al. Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 111–120. (in Chinese)
- [12] 范仲学, 王璞, BOENING-ZILKENS M, 等. 育苗移栽夏玉米灌浆特性研究[J]. 玉米科学, 2001(2): 47–49. FAN Zhongxue, WANG Pu, BOENING-ZILKENS M, et al. Study on grain filling characteristics of transplanted summer maize [J]. Journal of Maize Science, 2001(2): 47–49. (in Chinese)
- [13] 张仁和, 胡富亮, 杨晓钦, 等. 不同栽培模式对旱地春玉米光合特性和水分利用率的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(9): 1619–1627. ZHANG Renhe, HU Fuliang, YANG Xiaoqin, et al. Effects of different cultivation patterns on photosynthetic characteristics and water use efficiency in dryland spring maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(9): 1619–1627. (in Chinese)
- [14] CHEN X, CHEN F, CHEN Y, et al. Modern maize hybrids in Northeast China exhibit increased yield potential and resource use efficiency despite adverse climate change[J]. Global Change Biology, 2013, 19(3): 923–936.
- [15] POORTER L, BONGERS F. Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species[J]. Ecology, 2006, 87(7): 1733–1743.
- [16] 方恒, 李援农, 谷晓博, 等. 覆膜与施氮组合下夏玉米籽粒灌浆过程拟合分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 245–252. FANG Heng, LI Yuannong, GU Xiaobo, et al. Fitting and analysis of grain filling of summer maize under combination of film mulching and nitrogen fertilizer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 245–252. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180829&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.029. (in Chinese)
- [17] MASCLAUX-DAUBRESSE C, REISDORF-CREN M, ORSEL M. Leaf nitrogen remobilization for plant development and grain filling[J]. Plant Biology, 2008, 10(Supp.): 23–36.
- [18] THOMAS H, OUGHAM H. The stay-green trait[J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(14): 3889–3900.

- 2017.2780842.
- [16] KUANG H L, LIU C R, CHAN L L H, et al. Multi-class fruit detection based on image region selection and improved object proposals[J]. *Neurocomputing*, 2018,283:241 – 255.
- [17] NEUBECK A, VAN GOOL L. Efficient non-maximum suppression [C] // *International Conference on Pattern Recognition*. IEEE, 2006:850 – 855.
- [18] ZHANG T Y, SUEN C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns [J]. *Communications of the ACM*, 1984, 27(3):236 – 239.
- [19] DENG Weian, IYENGAR S S, BRENER N E. A fast parallel thinning algorithm for the binary image skeletonization [J]. *The International Journal of High Performance Computing Applications*,2000, 14(1):65 – 81.
- [20] DOLLAR P, ZITNICK C L. Fast edge detection using structured forests[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,2015,37(8):1558 – 1570.
- [21] CHAN T H, JIA K, GAO S H, et al. PCANet: a simple deep learning baseline for image classification [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(12):5017 – 5032.
- [22] HOSANG J, BENENSON R, DOLLAR P, et al. What makes for effective detection proposals [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,2016,38(4):814 – 830.
-

(上接第 303 页)

- [19] 王旭军, 徐庆国, 杨知建. 水稻叶片衰老生理的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2005,21(3): 187 – 190,210.
WANG Xujun, XU Qingguo, YANG Zhijian. Advances of research on rice leaf senescence physiology [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005,21(3): 187 – 190,210. (in Chinese)
- [20] 王国栋, 曾胜和, 陈云, 等. 控墒补灌下春玉米光合特性、叶片衰老研究及最适灌溉量估算[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(6):19 – 26.
WANG Guodong, ZENG Shenghe, CHEN Yun, et al. Estimation of photosynthetic characteristics, leaf senescence and optimal irrigation amount for spring maize by drip irrigation under controlled soil moisture and supplementary irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(6):19 – 26. (in Chinese)
- [21] 吕丽华, 赵明, 赵久然, 等. 不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(9): 2624 – 2632.
LÜ Lihua, ZHAO Ming, ZHAO Jiuran, et al. Canopy structure and photosynthesis of summer maize under different nitrogen fertilizer application rates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9): 2624 – 2632. (in Chinese)
- [22] 刘海坤, 刘小宁, 黄玉芳, 等. 不同氮水平下小麦植株的碳氮代谢及碳代谢与赤霉病的关系[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(7): 782 – 789.
LIU Haikun, LIU Xiaoning, HUANG Yufang, et al. Effect of nitrogen application on carbon and nitrogen metabolisms and relationship between carbon metabolism and wheat scab[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(7): 782 – 789. (in Chinese)
- [23] AVILA-OSPINA L, MASCLAUX-DAUBRESSE C. Autophagy, plant senescence, and nutrient recycling [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(14):3799 – 3811.
- [24] YANG L, GUO S, CHEN Q W, et al. Use of the stable nitrogen isotope to reveal the source-sink regulation of nitrogen uptake and remobilization during grain filling phase in maize[J]. *PLOS ONE*, 2016, 11(9):e0162201.
- [25] 陈均治, 王懿茜, 解君, 等. 密植条件下去叶处理对夏玉米籽粒灌浆及产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(9): 1296 – 1304.
CHEN Junzhi, WANG Yiqian, XIE Jun, et al. Effects of leaf removal on grain filling and yield of summer maize under high density [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(9): 1296 – 1304. (in Chinese)
- [26] 王晓慧, 张磊, 刘双利, 等. 不同熟期春玉米品种的籽粒灌浆特性[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(18): 3557 – 3565.
WANG Xiaohui, ZHANG Lei, LIU Shuangli, et al. Grain filling characteristics of maize hybrids differing in maturities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(18): 3557 – 3565. (in Chinese)
- [27] 田畅, 王洋, 卜险峰. 行向和种植方式对生育后期玉米叶片衰老进程的影响[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(1):55 – 62.
TIAN Chang, WANG Yang, BU Xianfeng. Effects of orientations and planting patterns on senescence of maize leaves at later growth stage[J]. *Soils and Crops*, 2018, 7(1):55 – 62. (in Chinese)
- [28] HUFFAKER R C. Proteolytic activity during senescence of plants [J]. *New Phytologist*, 2010, 116(2):199 – 231.
- [29] HWANG S M. Power velocity integral technique for quantification of flow in valvular heart disease[D]. *Massachusetts Institute of Technology*, 2000.
- [30] 高祺, 李明, 朴琳, 等. 拔节期弱光和渍水胁迫对春玉米光合作用、根系生长及产量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(6):1276 – 1286.
GAO Qi, LI Ming, PIAO Lin, et al. Effects of weak light and waterlogging stress at jointing stage on photosynthesis, root growth and yield of spring maize[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2018, 34(6):1276 – 1286. (in Chinese)