

氮肥运筹对苗期受渍夏玉米子粒灌浆特性和产量的影响

武文明¹, 王世济¹, 陈洪俭¹, 魏凤珍², 李金才²

(1. 安徽省农业科学院烟草研究所/玉米研究中心, 合肥 230031; 2. 安徽农业大学农学院, 合肥 230036)

摘要: 以玉米品种郑单958为试验材料, 研究氮肥全部基施(N1)、基肥70%+拔节肥30%(N2)、基肥50%+拔节肥50%(N3)和基肥30%+拔节肥50%+大喇叭口肥20%(N4)不同氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米子粒灌浆特性及产量的影响, 利用Logistic方程比较不同处理的玉米子粒灌浆过程。结果表明, 渍水处理降低子粒千粒重最大潜力值, 降幅达5.5%~10.3%; 灌浆持续期缩短, 最高达9 d; 平均灌浆速率降低, 最大灌浆速率出现的时间提前。氮肥后移较氮肥前移处理提高子粒最大潜力值; 平均灌浆速率增大, 最高达22.4%; 最大灌浆速率出现“滞后性”, 最高延迟13.8%, 有利于减轻苗期渍害对子粒灌浆特性的影响。通径分析表明, 最大灌浆速率出现的时间、平均灌浆速率和渐增期灌浆速率对粒重影响较大, 表现为 $T_{m} > V_{i} > V_{j}$ 。苗期渍水抑制子粒灌浆速率, 导致夏玉米产量下降, 降幅达24.2%~25.7%, 氮肥后移能够减轻苗期渍害对产量的影响。

关键词: 夏玉米; 渍水; 氮肥后移; 灌浆特性; 产量

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Nitrogen Fertilization on Grain Filling Characteristics in Summer Maize under Waterlogging at the Seedling Stage

WU Wen-ming¹, WANG Shi-ji¹, CHEN Hong-jian¹, WEI Feng-zhen², LI Jin-cai²

(1. Tobacco Research Institute/ Corn Research Center, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031;

2. College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Field experiments were carried out to clarify the grain yield and grain filling characteristics of maize after waterlogging in the seedling stage using summer maize cultivar “Zhengdan958”. Under waterlogging and control(normal watering) conditions, four N application treatments with different N application ratios were implemented. The results showed that waterlogging stress in the seedling stage decreased the final grain weight by 5.5% - 10.3%, duration of grain filling and average grain filling stage also decreased, while the date of the maximum grain filling rate occurred advanced by 3.1%. Postponed nitrogen application increased the average grain filling rate and the maximum grain filling rate occurred delayed, the results indicate that postpone of nitrogen application can alleviate the effect of waterlogging on the grain filling characteristics. Path analysis results showed that the date of maximum grain filling rate occurred, average grain filling rate and early duration stage had positive relationship with final grain weight. Waterlogging stress in the seedling stage decreased grain filling rate, which results in grain yield significantly decreased by 24.2% - 25.7%, postponed nitrogen application was able to alleviate the effect of waterlogging on grain yield.

Key words: Summer maize; Waterlogging; Postponed nitrogen application; Filling characteristic; Yield

收稿日期: 2016-05-09

基金项目: 安徽省农业科学院学科建设项目(16A0927, 15A0926)

作者简介: 武文明(1983-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事作物生理生态学研究。Tel: 18005699533

E-mail: wuwm1126@163.com

李金才为本文通讯作者。

玉米苗期生长过程遇到连续降雨或洪涝灾害, 造成土壤渍水, 往往会影响植株的正常生长发育^[1~3]。玉米根系长期处于低氧状态, 导致玉米减产, 苗期渍害已成为制约高产稳产的一个重要的非生物胁迫因子^[4, 5]。

玉米子粒灌浆特性影响子粒产量, 水分在很大

程度上影响子粒灌浆过程及子粒品质形成。杨京平等^[6]通过计算机模拟分析表明,在土壤水分及自然降雨的影响下,春玉米4、6叶期为渍害敏感时期。任佰朝^[7]研究认为,3叶期淹水减产幅度最大,淹水胁迫降低了子粒最大灌浆速率及灌浆速率最大时的生长量,抑制了子粒灌浆,严重影响子粒干物质的积累。余卫东^[8]研究认为,拔节期和抽雄期涝渍胁迫缩短灌浆期总天数,且主要表现为粒重快速增长期和缓增期天数减少。

除水分影响子粒灌浆外,氮素对玉米器官建成同样具有重要作用^[9],如何协同提高玉米产量和养分效率是当前农业上面临的重大课题。施氮对灌浆期玉米叶片光合能力、碳代谢能力等均有显著提升作用^[10]。研究认为,拔节期和灌浆期追施氮肥子粒的灌浆速率高于一次性基施氮肥,且随追氮次数的增加灌浆后期百粒重增加^[11]。苗期渍水逆境下子粒灌浆特性将发生显著变化,关于苗期渍水逆境下如何合理运筹氮肥增强受渍夏玉米子粒灌浆特性尚未明晰。本文研究不同氮肥施用时期对苗期渍水夏玉米子粒灌浆特性和产量的影响,明确氮肥对苗期受渍夏玉米子粒灌浆特性的调控效应,为逆境条件下稳定夏玉米产量的氮素营养调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于安徽省五河县龙潭湖示范繁殖农场进行(33°14' N, 117°87' E)。全年平均气温15.5℃,降水952 mm。供试土壤为河流冲积母质形成的潮土,0~20 cm土层含有机质23.6 g/kg、水解氮118.4 mg/kg、速效钾269.6 mg/kg、速效磷25.40 mg/kg。

1.2 试验设计

供试品种为郑单958,密度为675 00株/hm²。设玉米苗期4~5叶期渍水7 d处理,其保持田面1~2 cm水层;正常条件(未渍水)为对照。渍水处理和对照均设4个氮肥运筹方式,分别为氮肥全部基施(N1)、基肥70%+拔节肥30%(N2)、基肥50%+拔节肥50%(N3)、基肥30%+拔节肥50%+大喇叭口肥20%(N4)。全生育期纯氮总施用量为240 kg/hm²,氮肥种类为尿素。各小区于播种前施P₂O₅ 112.5 kg/hm²、K₂O 112.5 kg/hm²,撒施于地表后耕翻入土。

采用裂区设计,渍水处理为主区,氮肥处理为副区,4次重复,小区面积3.6 m×6.0 m,各小区间隔50 cm。渍水处理时,深挖50 cm埋不透水塑料布阻止各小区水分的流动,其余栽培管理同高产大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量与群体质量指标测定

采用小区计产的方法,每个小区连续收获40个果穗,4次重复,折算单产(按照14%标准含水量)。根据产量结果,采用均穗法从收获的160个果穗中选取接近平均值的40个果穗调查穗部性状,测定产量构成要素。

1.3.2 子粒灌浆过程的模拟

采用Logistic方程 $Y = K/(1 + e^{A+Bt})$ 拟合子粒千粒重(Y)随开花后天数(t)的变化规律。式中,K为千粒重潜力值,A和B为参数。根据Logistic方程和该方程的一级和二级导数,推导出灌浆高峰期起始(t₁)和结束时间(t₂),灌浆终期(t₃,即Y达99% K的时间),子粒灌浆渐增期(T₁)、快增期(T₂)和缓增期持续时间,灌浆持续天数(T)和子粒平均灌浆速率(V_a),子粒灌浆渐增期、快增期和缓增期的灌浆速率(V₁、V₂、V₃)及各时期子粒灌浆的积累量(W₁、W₂、W₃)。

$$t_1 = [A - \ln(2 + 1.732)] / (-B)$$

$$t_2 = [A + \ln(2 + 1.732)] / (-B)$$

$$t_3 = -(4.595 \ln 2 + A) / B$$

$$T_1 = t_1$$

$$T_2 = t_2 - t_1$$

$$T_3 = t_3 - t_2$$

$$T = t_3$$

$$V_a = K / T$$

$$W_1 = K / (1 + e^{A+Bt_1})$$

$$W_2 = K [1 / (1 + e^{A+Bt_2}) - 1 / (1 + e^{A+Bt_1})]$$

$$W_3 = K [1 / (1 + e^{A+Bt_3}) - 1 / (1 + e^{A+Bt_2})]$$

$$V_1 = W_1 / T_1; V_2 = W_2 / T_2; V_3 = W_3 / T_3$$

2 结果与分析

2.1 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米产量的影响

2.1.1 苗期渍害对玉米产量的影响

对照处理产量大都超过9 000 kg/hm²,渍水处理产量均低于7 500 kg/hm²,渍水处理产量较对照降低了28.8%。方差分析表明,苗期渍水处理产量显著低于对照处理(P<0.05)。

2.1.2 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米产量的影响

氮肥后移提高玉米子粒产量,渍水处理的N4较N1、N2和N3处理产量分别提高12.8%、7.1%和2.0%;对照处理的N4较N1、N2和N3处理产量分别提高11.5%、6.7%和1.6%。方差分析表明,N1处理显著低于N2、N3和N4处理(P<0.05),表明苗期渍水条件下,氮肥后移能够减轻苗期渍害对玉米产量的影响。

表 1 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米产量和构成因素的影响

处 理	穗行数(行)	穗粒数(粒)	千粒重(g)	产量(kg/hm ²)	减产率(%)
Treatment	Rows per ear	Kernels per ear	1000-kernel weight	Yield	Yield reduction rate
渍水处理					
N1	14.5±0.5 a	429.2±5.8 b	281.3±3.8	6213.2 ± 474.5 b	11.3
N2	14.5±0.2 a	431.2±23.4 b	285.3±5.0	6542.4 ± 370.4 a	6.6
N3	15.1±0.3 a	472.1±8.9 a	291.6±1.5	6870.0 ± 392.1 a	2.0
N4	15.0±0.0 a	488.5±4.8 a	296.3±6.4	7007.1± 196.1 a	0
对照					
N1	14.5±0.3 b	515.5±23.3 a	296.6±4.3	8790.1 ± 292.7 b	10.3
N2	14.5±0.1 b	536.5±17.6 a	301.8±8.9	9186.8 ±299.3 a	6.6
N3	14.8±0.3 ab	539.2±11.8 a	307.5±4.7	9641.2 ±384.9 a	1.6
N4	15.4±0.1 a	545.1±39.7 a	308.6±1.0	9799.1 ± 84.8 a	0

注:不同小写字母表示不同氮肥运筹方式在 $P<0.05$ 水平上差异显著。
Note: Values followed by different letters indicated significantly different($P<0.05$) under different nitrogen treatments.

2.2 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米子粒灌浆动态的影响

2.2.1 苗期渍害对玉米子粒干物质积累的影响

不同处理子粒增重符合慢-快-慢的“S”形生长曲线(图 1),子粒干重可用 Logistic 方程 $Y = K/(1+e^{A+Bx})$ 较好拟合($R^2=0.989\ 5\sim0.998\ 9$)。苗期渍水处理对子粒干物重的增长趋势无显著影响,但渍水处理子粒灌浆过程中粒重低于对照。渍水条件下,N1、N2、N3、N4 处理最终粒重较对照分别下降 10.3%、8.4%、6.4%和 5.5%。

2.2.2 氮肥运筹方式对子粒干物质积累的影响

成熟期,N4 处理百粒重高于其他氮肥处理。渍水条件下,百粒重 N1、N2 和 N3 较 N4 处理分别下降 17.9%、8.8%和 4.4%;对照不同氮肥处理较 N4 处理分别下降 14.8%、9.2%和 5.4%。渍水和对照条件下,N1 处理较 N4 处理下降幅度均高于 N2 处理和 N3 处理,其中,渍水条件下 N1 处理较 N4 处理下降幅度高于对照。渍水条件下,N4 处理 T_m 、 V_m 和 V_a 高于其他氮肥处理;对照条件下,N4 处理灌浆持续期(T)和 T_m 高于其他氮肥处理。

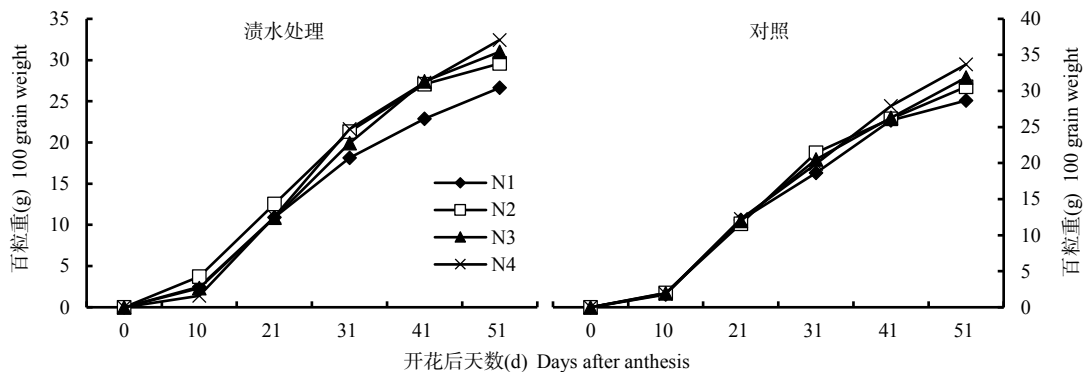


图 1 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米子粒干物质积累的影响

Fig.1 Effects of different nitrogen treatments on grain weight accumulation under waterlogging at seedling stage

2.3 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米子粒灌浆动态的影响

2.3.1 苗期渍害对子粒灌浆动态的影响

玉米子粒灌浆速率随生育进程的推进呈单峰曲线(图 2),于吐丝后 20~30 d 达到最大值。渍水处理最大潜力势(K)低于对照,较早达到最大灌浆速率(V_m),平均灌浆速率(V_a)低于对照。

渍水处理最大灌浆速率(V_m)为 0.88~1.17 g/d;对照 V_m 为 0.98~1.11 g/d,渍水处理较对照下降 0.5% (表 2)。渍水处理平均灌浆速率(V_a)为 0.45~0.56 g/d;对照 V_a 为 0.49~0.54 g/d,渍水处理 V_a 低于对照,降低 1.1%。渍水处理 V_m 出现的时间(T_m)早于对照,渍水处理 T_m 为吐丝后 24.0~26.9 d;对照为 24.9~28.4 d,渍水处理 T_m 早于对照,较对照降低 3.1%。渍水处理

灌浆持续期(T)为57.5~61.3 d;对照为56.1~67.1 d,渍水处理 T 低于对照,降幅达3.6%。渍水处理 T_1 、 T_2 和 T_3 较对照分别下降2.5%、4.0%和4.0%; V_1 、 V_2 和 V_3 分别下降1.9%、0.5%和0.5%。渍水处理 W_1 、 W_2 和 W_3 低于对照。

2.3.2 氮肥运筹方式对子粒灌浆动态的影响

不同氮肥处理间,前期N2处理灌浆速率相对较快,其他时期N4处理高于其他氮肥处理。N4处理 V_a 、 K 高于N1处理,最大灌浆速率出现时间上的“滞后性”。不同氮肥处理间 V_a 表现为N4>N3>N2>N1, T 总体表现为N4、N3>N2、N1(表2)。

渍水条件下,N4处理 T_m 、 V_m 和 V_a 高于其他氮肥处理; T_m 较N1和N2处理分别增加5.4%和9.8%; V_m 较N1、N2和N3处理分别增加33.0%、13.6%和9.3%; V_a 较N1、N2和N3处理分别增加22.4%、7.7%和7.7%。对照条件下,N4处理 T 和 T_m 高于其他氮肥处理; T_m 较N1、N2和N3处理分别增加11.2%、13.8%和6.9%; T 较N1、N2和N3处理分别增加12.2%、19.6%和7.5%。渍水处理降低灌浆各参数,氮肥后移技术能够弥补各参数下降趋势,是渍水条件下氮肥后移技术较氮肥前移技术玉米粒重提高的主要因素。

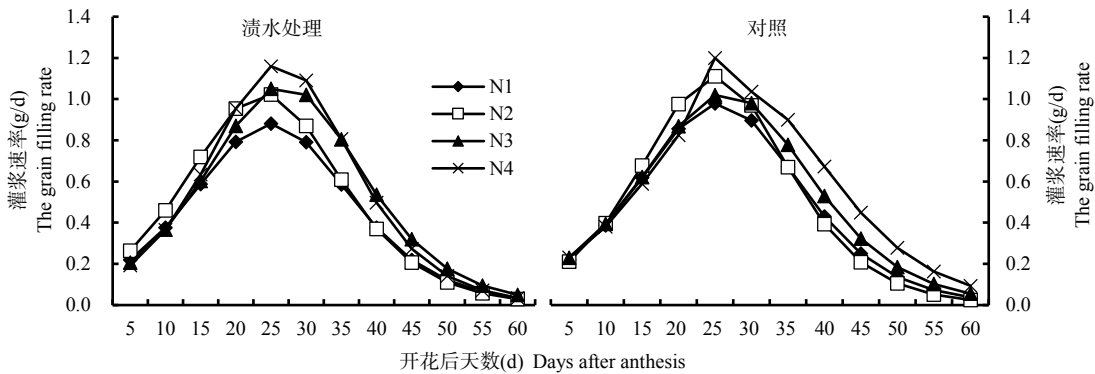


图2 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米子粒灌浆速率的影响

Fig.2 Effects of different nitrogen treatments on grain-filling rate under waterlogging at seedling stage

表2 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米子粒灌浆特征参数的影响

Table 2 Effects of different nitrogen treatments on grain filling characteristics parameters under waterlogging in the seedling stage

处 理 Treatment	模拟方程 Simulative equation	R^2	K	T_m	V_m	T	V_a	T_1	T_2	T_3	V_1	V_2	V_3	W_1	W_2	W_3
渍水处理																
N1	$y=26.688\ 3/(1+e^{(3.299\ 2-0.132\ 027x)})$	0.993\ 3	26.69	24.99	0.88	59.79	0.45	15.01	19.95	24.83	0.38	0.77	0.44	5.64	15.41	11.01
N2	$y=29.970\ 3/(1+e^{(3.285\ 8-0.137\ 043x)})$	0.998\ 9	29.97	23.98	1.03	57.51	0.52	14.37	19.22	23.92	0.44	0.90	0.52	6.33	17.30	12.37
N3	$y=31.924\ 1/(1+e^{(3.588\ 0-0.133\ 563x)})$	0.997\ 3	31.92	26.86	1.07	61.27	0.52	17.00	19.72	24.54	0.40	0.93	0.54	6.75	18.43	13.17
N4	$y=32.219\ 9/(1+e^{(3.826\ 3-0.145\ 301x)})$	0.997\ 8	32.22	26.33	1.17	57.96	0.56	17.27	18.13	22.56	0.39	1.03	0.59	6.81	18.60	13.30
CV(%)					5.12	11.57	2.93	9.04	9.06	4.21	4.21	6.88	11.57	11.57	8.43	8.43
对照																
N1	$y=29.235\ 1/(1+e^{(3.422\ 2-0.134\ 050x)})$	0.989\ 5	29.24	25.53	0.98	59.81	0.49	15.70	19.65	24.45	0.39	0.86	0.49	6.18	16.88	12.06
N2	$y=30.128\ 0/(1+e^{(3.679\ 5-0.147\ 508x)})$	0.993\ 5	30.13	24.94	1.11	56.10	0.54	16.02	17.86	22.22	0.40	0.97	0.56	6.37	17.39	12.43
N3	$y=32.131\ 4/(1+e^{(3.403\ 0-0.128\ 185x)})$	0.989\ 9	32.13	26.55	1.03	62.40	0.51	16.27	20.55	25.57	0.42	0.90	0.52	6.79	18.55	13.26
N4	$y=35.251\ 1/(1+e^{(3.368\ 9-0.118\ 679x)})$	0.990\ 0	35.25	28.39	1.05	67.11	0.53	17.29	22.19	27.62	0.43	0.92	0.53	7.45	20.35	14.55
CV(%)					5.73	5.20	7.54	3.98	4.21	9.02	9.02	4.27	5.20	5.20	8.42	8.42

2.4 子粒灌浆参数与百粒重的通径分析

不同灌浆参数与百粒重进行相关性分析, $T_m(x_1)$ 和 $T_1(x_5)$ 与百粒重均呈显著正相关($R^2=0.822^*$, $R^2=0.778^*$)。通径分析表明, $T_m(x_1)$ 、 $V_a(x_2)$ 和 $V_1(x_3)$ 对粒重

影响较大,且对百粒重的直接通径系数为正向效应,表现为 $T_m>V_a>V_1$,各参数的间接作用也均为正相关,通径方程为 $y=-32.051+1.228x_1+30.542x_2+37.942x_3$ (表3)。

表3 子粒灌浆参数与百粒重的通径分析

Table 3 Path and regression analysis between grain filling parameters and 100-kernel grain weight

通径 $x_i \rightarrow y$ Path	直接作用 Direct effect	间接作用 Indirect effect			
		总间接作用 Total indirect effect	T_m $\rightarrow x_1$	V_a $\rightarrow x_2$	V_i $\rightarrow x_3$
x_1	0.666	0.156 4	—	0.115 9	0.040 5
x_2	0.401	0.298 1	0.192 5	—	0.105 6
x_3	0.319	0.217 3	0.084 6	0.123 7	—

3 结论与讨论

3.1 不同氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米产量及构成因素的影响

玉米苗期不同程度渍水均会导致产量下降,下降幅度与受渍生育期、受渍程度、受渍时间长短有关^[12]。任佰朝研究表明,玉米不同时期渍水,减产幅度表现为3叶期淹水>拔节期淹水>开花后10 d淹水,淹水6 d>淹水3 d。水分胁迫,果穗建成受到严重影响,使果穗体积减小,导致库容量不足,无法贮存较多的干物质^[13]。本研究表明,苗期渍水7 d,玉米子粒产量下降约25%,由于渍水导致玉米地上部分生长受阻,穗下层叶片较早衰老使得群体LAI降低,从而导致源的供应能力下降。

玉米对氮肥较为敏感,氮素对玉米器官建成具有重要作用,施氮后增产效果明显。张起君报道,合理施肥在玉米增产诸多因素中起28%~30%的作用。苗期渍水,土壤氮素以NO₃-N形式淋溶至土壤深处,土壤中可供利用的矿质态氮浓度降低,根系吸收利用的养分减少^[14]。氮肥用量不足导致穗叶叶肉细胞叶绿体结构性差、细胞碳水化合物积累少、营养体氮素再分配比率失衡,加速了叶片后期生长进程,使叶片提早衰老^[15]。Osaki等^[16]认为,营养体过量的氮素转移将导致叶片早衰及光合能力下降。施氮可明显促进同化物的积累及向顶部子粒的供应,促进顶部子粒灌浆,减少败育,增加有效粒数,提高产量^[17]。本研究表明,苗期渍水下氮肥后移减轻苗期渍害对产量的影响,这可能由于氮肥后移通过增大穗位层和穗上层叶片的LAI来弥补穗下层LAI降低导致的群体LAI降低的趋势,且弥补的效应大于渍害导致穗下层LAI降低的效应,进而使得苗期渍害下氮肥后移的群体LAI较氮肥前移增大,源的供应能力提高,产量升高。

3.2 不同氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米灌浆特性的影响

玉米子粒灌浆特性影响子粒产量,灌浆速率的

高低及灌浆持续期的长短决定最终子粒产量。对于子粒灌浆过程进行方程拟合,推导出具有生物学意义的特征参数,能更好地解释子粒灌浆过程。子粒灌浆进程可分为渐增期、快增期和缓增期3个阶段,渐增期形成大库容是实现高产的先决条件,快增期向库容中调运库容物质是保证高产的基础。本研究表明,子粒灌浆过程3个不同时期长短表现为缓增期>快增期>渐增期。生产中采取栽培措施来缩短渐增期持续时间、延长快增期持续时间是提高粒重的重要措施。子粒最终粒重主要由平均灌浆速率,渐增期灌浆速率和达到最大灌浆速率的时间决定。陈传永^[18]研究认为,品种特性决定粒重与灌浆参数的关系,品种间粒重差异由活跃灌浆天数决定。对于不同熟期品种,在保证子粒安全成熟前提下延长灌浆活跃期、有效灌浆时间、快增期和缓增期持续时间,提高渐增期灌浆速率,有利于提高不同熟期玉米产量^[19]。本研究表明,渍水处理导致灌浆持续期缩短,达到最大灌浆速率时间提前,平均灌浆速率、最大灌浆速率降低,粒重下降。氮肥后移较氮肥前移处理延长子粒灌浆持续期,提高子粒灌浆速率,最大灌浆速率出现时间上的“滞后性”。氮肥后移技术能弥补渍水导致 V_a 和 T 下降的趋势,是渍水条件下氮肥后移技术较氮肥前移技术玉米粒重提高的主要因素。苗期渍水造成氮素流失,全部基施的氮肥运筹方式不适用于苗期渍水环境,氮肥后移以保证灌浆期内光合产物的积累和转运,渍水条件下氮肥后移对子粒积累的补偿效应较大。

参考文献:

[1] 郭庆法,王庆成,汪黎明. 中国玉米栽培学[M]. 上海:科学技术出版社,2004.

[2] 李瑞秋,高小彦,吴敦肃. 淹水对玉米苗期某些生理和形态的影响[J]. 植物学报,1991,33(6):473-477.

Li R Q, Gao X Y, Wu D S. Some physiological and morphological responses in flooded maize[J]. Acta Botanica Sinica, 1991, 33(6): 473-477. (in Chinese)

[3] Rai R K, Srivastava J P, Shahi J P. Effects of waterlogging on some biochemical parameters during early growth stage of maize[J]. Indian

- Journal of Plant Physiology, 2004, 9(1): 65–68.
- [4] 陈国平, 赵仕孝, 杨洪友, 等. 玉米的涝害及其防御措施的研究 I. 芽涝对玉米出苗及苗期生长的影响[J]. 华北农学报, 1988, 3(2): 12–17.
- Chen G P, Zhao S X, Yang H Y, et al. Studies on waterlogging of corn and protection measures I. Effects of waterlogging at bud bursting stage on the emergence and early growth of seedling of corn [J]. Acta Agricultura Boreali Sinica, 1988, 3(2): 12–17. (in Chinese)
- [5] 武文明, 陈洪俭, 王世济, 等. 氮肥运筹对苗期受渍夏玉米干物质和氮素积累与转运的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(8): 1246–1256.
- Wu W M, Chen H J, Wang S J, et al. Effects of nitrogen fertilization application regime on dry matter, nitrogen accumulation and transportation in summer maize under waterlogging at the seedling stage [J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(8): 1246–1256. (in Chinese)
- [6] 杨京平, 陈杰. 计算机模拟渍水时期及持续时间对春玉米生长及产量的影响[J]. 生物数学学报, 2001, 16(3): 353–361.
- Yang J P, Chen J. Modeling the effects of soil waterlogging stage and duration on the development and yield of spring corn[J]. Journal of Biomathematics, 2001, 16(3): 353–361. (in Chinese)
- [7] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 淹水胁迫对夏玉米子粒灌浆特性和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4435–4445.
- Ren B C, Zhang J W, Li X, et al. Effect of waterlogging on grain filling and quality of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(21): 4435–4445. (in Chinese)
- [8] 余卫东, 冯利平, 盛绍学, 等. 涝渍胁迫下夏玉米的灌浆特征及动态模拟[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1142–1149.
- Yu W D, Feng L P, Sheng S X, et al. Analysis of the dynamics and characteristics of grain filling in summer maize under waterlogging stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(9): 1142–1149. (in Chinese)
- [9] 张起君. 玉米高产开发原理与技术[M]. 山东: 科学技术出版社, 1992.
- [10] 李从锋, 赵明, 刘鹏, 等. 中国不同年代玉米亲本自交系的灌浆特性及氮素转运[J]. 作物学报, 2014, 40(11): 1990–1998.
- Li C F, Zhao M, Liu P, et al. Characteristics of grain filling and nitrogen translocation of maize parent lines released in different ears in China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(11): 1990–1998. (in Chinese)
- [11] 刘明, 齐华, 张卫健, 等. 深松与施氮方式对春玉米子粒灌浆及产量和品质的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(3): 115–119, 130.
- Liu M, Qi H, Zhang W J, et al. Effects of deep loosening and nitrogen application methods on grain filling, yield and quality spring maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(3): 115–119, 130. (in Chinese)
- [12] 梁哲军, 陶洪斌, 王璞. 淹水解除后玉米幼苗形态及光合生理特征恢复[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3977–3986.
- Liang Z J, Tao H B, Wang P. Recovery effects of morphology and photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) seedling after water logging[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3977–3986. (in Chinese)
- [13] 白向历, 孙世贤, 杨国航, 等. 不同生育时期水分胁迫对玉米产量及生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(2): 60–63.
- Bai X L, Sun S X, Yang G H, et al. Effects of water stress on maize yield during different growing stages[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(2): 60–63. (in Chinese)
- [14] 范亚宁, 李世清, 李生秀. 半湿润地区农田夏玉米氮肥利用率及土壤硝态氮动态变化[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 799–806.
- Fan Y N, Li S Q, Li S X. Utilization rate of fertilizer N and dynamic changes of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ in summer maize field in semi humid area of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 799–806. (in Chinese)
- [15] 何萍, 金继运. 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. Effects of N application rates on leaf senescence and its mechanism in spring maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1998, 31(3): 66–71. (in Chinese)
- [16] Osaki M, Makoto L, Toshiaki T. Ontogenetic changes in the contents of ribulose-1,5 bisphosphate carboxylase/oxygenase, phosphoenolpyruvate carboxylase and chlorophyll in individual leaves of maize[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1995, 41: 285–293.
- [17] 申丽霞, 王璞, 张软斌. 施氮对不同种植密度下夏玉米产量及子粒灌浆的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 314–319.
- Shen L X, Wang P, Zhang R B. Effects of nitrogen supply on yield and grain filling in summer maize with different crop density[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3): 314–319. (in Chinese)
- [18] 陈传永, 王荣焕, 赵久然, 等. 不同生育时期遮光对玉米子粒灌浆特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(9): 1650–1657.
- Chen C Y, Wang R H, Zhao J R, et al. Effects of shading on grain filling properties and yield of maize at different growth stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(9): 1650–1657. (in Chinese)
- [19] 王晓慧, 张磊, 刘双利, 等. 不同熟期春玉米品种的子粒灌浆特性[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3557–3565.
- Wang X H, Zhang L, Liu S L, et al. Grain filling characteristics of maize hybrids differing in maturities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(18): 3557–3565. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)