

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.029

覆膜与施氮组合下夏玉米籽粒灌浆过程拟合分析

方恒 李援农 谷晓博 银敏华 杨金字

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为揭示不同地膜覆盖与施氮水平组合对夏玉米籽粒灌浆过程的影响规律,进行了地膜覆盖(普通地膜、氧化-生物双降解生态地膜,记为P和J)和尿素(纯氮0、90、180、270 kg/hm²,记为N0、N1、N2和N3)对夏玉米灌浆特征参数和叶绿素a/b影响的试验。结果表明,一定范围内随施氮水平的提高,延迟了达到最大灌浆速率的时间,最大延迟6.273 d,但提高了最大灌浆速率和平均灌浆速率,分别提高1.489 mg/d和1.062 mg/d。地膜覆盖配施氮肥主要延长了灌浆快增期和缓增期持续时间,分别延长0.554~6.839 d和1.627~12.355 d,并分别提高了快增期和缓增期的平均灌浆速率1.125 mg/d和0.285 mg/d。普通地膜覆盖主要延长灌浆渐增期持续时间,并提高灌浆速率,而氧化-生物双降解地膜延长灌浆持续时间和提高灌浆速率的作用在快增期和缓增期逐渐显现。地膜覆盖配施氮肥推迟了叶绿素a/b质量比达到最大值的时间(12~24 d),但延长了光合活性持续时间,有利于提高籽粒质量。

关键词: 夏玉米; Richards模型; 灌浆; 地膜覆盖; 施氮水平; 叶绿素

中图分类号: S143.1⁺4; S513 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)08-0245-08

Fitting and Analysis of Grain Filling of Summer Maize under Combination of Film Mulching and Nitrogen Fertilizer

FANG Heng LI Yuannong GU Xiaobo YIN Minhua YANG Jinyu

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to reveal the effect law of different film mulching with nitrogen (N) fertilizer rate on the grain filling process of summer maize, the experiment of film mulching (plastic film, oxidation-biodegradable film, denoted as P and J) combined with urea (pure N 0 kg/hm², 90 kg/hm², 180 kg/hm² and 270 kg/hm², recorded as N0, N1, N2 and N3) was conducted to analyze the filling characteristic parameters and chlorophyll a/b content of summer maize. The results showed that within a certain range, with the increase of N application rate, the time to reach the maximum filling rate was delayed (maximum delay of 6.273 d), but the maximum filling rate and the average filling rate were increased, which were increased by 1.489 mg/d and 1.062 mg/d, respectively. Film mulching with N rate mainly prolonged the duration of fast-increase and slow-increase periods of filling, with 0.554~6.839 d and 1.627~12.355 d, respectively, and increased the average filling rate at fast-increase and slow-increase periods by 1.125 mg/d and 0.285 mg/d. P mainly extended duration of slight-increase, and improved the filling rate, while effect of J on extending the filling duration and improving the filling rate gradually appeared in fast-increase and slow-increase periods. Film mulching with N rate delayed the time of chlorophyll a/b to reach maximum (12~24 d), but prolonged the duration of photosynthetic activity, which was conducive to improve the quality of grain.

Key words: summer maize; Richards model; grain filling; film mulching; nitrogen fertilization rate; chlorophyll

0 引言

地膜覆盖栽培技术自试验并推广以来,广泛

用于经济作物和粮食作物生产,其增产增收效益显著。地膜覆盖具有减少土壤水分蒸发,提高土壤温度,促进作物稳产早熟^[1-3],防止农田水土流

收稿日期: 2018-02-25 修回日期: 2018-05-10

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503125)

作者简介: 方恒(1992—),男,博士生,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: fangheng8571@163.com

通信作者: 李援农(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术及3S技术应用研究,E-mail: liyuannong@163.com

失,减少氮素淋溶,有效控制土壤盐碱度^[4-6]等作用,已成为我国干旱半干旱地区农业生产的重要措施。随着地膜生产量和使用量的大幅增长,加上质量得不到保障,地膜残留问题日益突出。耕地中残留的地膜造成土壤理化性质变差,阻碍作物根系生长和对水肥的吸收利用,污染农田生态环境等^[7-8]。近年来,为了解决地膜残留问题,各种环保地膜先后问世,可降解地膜因其容易降解而减少地膜残留,降低回收成本,减轻环境污染等成为国内外研究较多的一种环保地膜。目前可降解地膜主要有光降解、生物降解和双降解地膜等类型。有关研究发现,生物降解膜代替普通地膜覆盖除了能改善土壤物理性状、促进作物的生长发育和水分利用效率外^[9-10],还有利于自然降水入渗,延长作物生殖生长周期,提高作物的产量^[11]等。而氧化-生物双降解地膜由于光照、氧气和微生物的协同作用,埋土和地表部分均可降解,不影响下季耕作,可基本消除残膜危害。

氮素是玉米需求量最大的营养元素,在干旱半干旱地区,施氮可以提高作物产量,增强作物抗旱能力^[12],但过量施氮将限制作物生长导致减产,还会破坏自然环境。相关研究表明,随施氮量增加,玉米籽粒产量和氮素利用效率均呈现先增加后减小的趋势^[13],而适宜施氮量有利于调控作物生长发育,改善光合性能,实现优质高产^[14]。

灌浆是夏玉米生长发育过程中重要的生育阶段,籽粒灌浆速率和灌浆时间影响籽粒库容的充实程度,决定了玉米的品质和产量^[15]。目前对夏玉米灌浆过程的研究主要集中在氮肥运筹^[16]、玉米品种^[17]、耕作方式^[18]等方面,不同地膜覆盖与施氮水平组合对夏玉米灌浆过程动态变化的研究甚少,而且多使用 Logistic 模型进行拟合分析。Logistic 模型是 Richards 模型的一种特殊形式($N=1$),其曲线呈旋转对称,缺乏可塑性,而 Richards 模型较其多一个参数 N ,曲线形状由 N 决定,描述籽粒灌浆过程更为合适^[19]。本文以夏玉米为研究对象,设置不同地膜覆盖(普通地膜和氧化-生物双降解地膜)与施氮水平组合的对比试验,应用 Richards 模型对夏玉米籽粒灌浆动态过程进行拟合,结合灌浆期内叶绿素 a/b 质量比(下面简称叶绿素 a/b 值)变化,进而研究不同地膜覆盖与施氮水平组合对夏玉米各灌浆特征参数的调控效应,揭示不同地膜覆盖与施氮水平组合对夏玉米籽粒灌浆过程的影响规律,为在高效、环保的地膜覆盖和施氮水平组合下获得高产提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017 年 6—10 月在陕西杨凌西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室的灌溉试验站进行。该区位于东经 108°24',北纬 34°20',海拔 521 m,全年无霜期 210 d,年均气温 13℃,多年平均降水量为 632 mm,年均蒸发量 1 500 mm。试验地土壤质地为中壤土,土壤田间持水率为 23%~25%(质量含水率),平均干容重 1.42 g/cm³。耕层土壤(0~30 cm)pH 值为 7.92,基础肥力(质量比)为:有机质 11.26 g/kg,硝态氮 69.05 mg/kg,速效磷 23.3 mg/kg,速效钾 88.48 mg/kg。

1.2 试验设计

供试玉米品种为吉祥 1 号,试验所用地膜为普通地膜和氧化-生物双降解生态地膜,氧化-生物双降解生态地膜由山东天壮环保科技有限公司生产。膜宽 90 cm,膜厚 0.008 mm,氧化-生物双降解生态地膜诱导期为 70~80 d。

试验设计覆膜施氮处理。2 种地膜覆盖:普通地膜(P)、氧化-生物双降解生态地膜(J);4 个施氮水平(尿素,总氮含量大于等于 46.4%);0、90、180、270 kg/hm²(纯氮),分别记为 N0、N1、N2、N3。采用垄沟种植技术,垄上覆膜,玉米植于垄两侧,株距 30 cm,垄宽 40 cm,垄高 30 cm,沟宽 60 cm,种植密度 6.7 万株/hm²,小区面积 18 m²(4.5 m×4 m),3 次重复,随机区组排列,另设平作不覆膜不施氮处理(CK),试验区周围设有保护行。播前旋耕并平整土地,各处理氮肥一次性施入,基施磷肥(过磷酸钙,全磷含量大于等于 16.0%)120 kg/hm²(纯 P₂O₅),钾肥(硫酸钾,氧化钾含量大于等于 51.0%)60 kg/hm²(纯 K₂O)。6 月 15 日播种,田间管理同一般高产田。氧化-生物双降解生态地膜降解规律:播种后 65 d(8 月 19 日左右)出现小于 1 cm 裂孔,70 d 左右(8 月 24 日)裂孔直径 2 cm,80 d 左右(9 月 3 日)裂孔直径 5 cm,90 d 左右(9 月 13 日)裂孔直径 10 cm,100 d 左右(9 月 23 日)裂孔直径 16 cm。

1.3 测定项目及方法

灌浆过程的测定:各处理选择吐丝一致的植株挂牌标记,玉米开花授粉 6 d 后开始取样,每隔 6 d 随机选取标记植株果穗 3 个,共取样 6 次(即花后 36 d)。将果穗从中间掰开,剥下中部籽粒,去除非完整籽粒后混合均匀,随机数出 100 粒,然后放入干燥箱内 105℃杀青 0.5 h,75℃干燥至恒质量,用万分之一天平称量籽粒干质量。

叶绿素含量测定:取果穗测灌浆过程的同时取

其穗位叶,用 95% 乙醇浸提^[20]测定叶绿素 a 和叶绿素 b 含量,重复 3 次,取其平均值。

1.4 模型描述

1.4.1 拟合模型

以花后时间 t (开花日为 t_0) 为自变量,每次测得的百粒干质量 (W) 为因变量,用非线性最小平方法配成 Richards 方程^[21]

$$W = A / (1 + Be^{-Kt})^{1/N}$$

式中 A 、 B 、 K 、 N 为模型参数, A 为灌浆结束时最大百粒质量,对籽粒灌浆过程进行拟合,用决定系数 R^2 表示其配合适度。

1.4.2 灌浆特征参数

对 Richards 方程求一阶导可得到灌浆速率方程 $V = KW[1 - (W/A)^N]/N$ 。根据朱庆森等^[19]的方法可以导出描述灌浆特征的次级参数:

起始生长势

$$R_0 = K/N \quad (1)$$

灌浆速率最大时生长量

$$W_{\max} = A / (1 + N)^{1/N} \quad (2)$$

最大灌浆速率及其时间

$$V_{\max} = KW_{\max} [1 - (W_{\max}/A)^N]/N \quad (3)$$

$$t_{\max} = \ln(B/N)/K \quad (4)$$

平均灌浆速率

$$\bar{V} = \frac{AK}{2(N+2)} \quad (5)$$

1.4.3 灌浆阶段

灌浆过程分为渐增期、快增期和缓增期。对灌浆速率方程求其对 t 的二阶导,并令其为零,可得灌浆速率方程两个拐点的灌浆时间 t_1 和 t_2 为

$$t_1 = \frac{-\ln \frac{N^2 + 3N + N \sqrt{N^2 + 6N + 5}}{2B}}{K} \quad (6)$$

$$t_2 = \frac{-\ln \frac{N^2 + 3N - N \sqrt{N^2 + 6N + 5}}{2B}}{K} \quad (7)$$

假定达 99% A 时为实际灌浆终期 t_3 , 则

$$t_3 = \frac{-\ln \frac{(100/99)^N - 1}{B}}{K} \quad (8)$$

所以灌浆渐增期为灌浆时间小于 t_1 ; 灌浆快增期为 $t_1 \sim t_2$; 灌浆缓增期为 $t_2 \sim t_3$ 。各阶段持续时间分别为 $T_1 = t_1 - t_0$ 、 $T_2 = t_2 - t_1$ 和 $T_3 = t_3 - t_2$; 平均灌浆速率分别为 \bar{V}_1 、 \bar{V}_2 和 \bar{V}_3 。

1.5 数据处理

采用 Excel 2013 对数据进行处理; SPSS 16.0 软件进行统计分析,多重比较使用 LSD 法(最小显著差异法) ($P < 0.05$); Origin 8.5 软件作图和 Nonlinear 拟合。

2 结果与分析

2.1 不同地膜覆盖与施氮水平下夏玉米籽粒灌浆 Richards 模型拟合分析

本研究应用 Richards 模型对夏玉米籽粒质量增长动态过程进行拟合,所得方程参数 A 、 B 、 K 、 N 及决定系数 R^2 见表 1。由表 1 分析知,各处理籽粒灌浆拟合方程决定系数均在 0.99 以上,拟合效果较好,表明用 Richards 模型能较好地模拟夏玉米籽粒灌浆动态过程。

表 1 不同处理下的 Richards 模型参数

Tab. 1 Parameters of Richards model under different treatments

处理	A/g	B	K	N	R^2
CK	20.792 ^a	23.692	0.151 0	0.763	0.996 4
JN0	21.653 ^a	11.764	0.127 9	0.573	0.993 9
JN1	24.491 ^a	23.396	0.142 0	0.658	0.998 7
JN2	30.994 ^a	2.003	0.108 2	0.224	0.998 9
JN3	29.110 ^d	14.657	0.109 3	0.671	0.993 6
PN0	21.356 ^b	18.289	0.135 0	0.718	0.995 9
PN1	24.911 ^c	76.470	0.151 4	1.112	0.998 9
PN2	30.345 ^b	1.545	0.109 1	0.174	0.999 3
PN3	29.543 ^c	9.090	0.099 4	0.506	0.997 8

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著,下同。

用 Richards 模型拟合的夏玉米籽粒质量增长动态过程见图 1。由表 1 和图 1 分析知,不同地膜覆盖与施氮水平下籽粒增长曲线均呈“慢—快—趋缓”的增长趋势。氧化—生物双降解生态地膜覆盖下的 N 值均小于 1,其质量增长速率曲线更为左偏。普通地膜覆盖下 PN1 的 N 值大于 1,其质量增长速率曲线右偏,其他施氮水平下质量增长速率曲线均为左偏。

根据 Richards 模型拟合计算出的夏玉米灌浆期灌浆特征参数见表 2。覆膜对整个灌浆期灌浆特征参数无显著影响,施氮对起始生长势 R_0 的影响达 $P < 0.05$ 水平,对达到最大灌浆速率的时间、最大灌浆速率、平均灌浆速率的影响达 $P < 0.01$ 水平,覆膜 × 施氮的交互作用对整个灌浆期灌浆特征参数的影响达 $P < 0.01$ 水平(表 3)。

起始生长势反映子房的生长潜力,起始生长势大,胚乳细胞分裂快,灌浆开始时间早。J 处理和 P 处理的起始生长势分别为 0.163 ~ 0.482、0.136 ~ 0.626,在 N0、N1 下 J 处理大于 P 处理, N2、N3 下 P 处理大于 J 处理。在 N0、N1、N3 下, J 处理达到最大灌浆速率的时间比 P 处理早 0.351 ~ 2.790 d,最大灌浆速率和平均灌浆速率分别比 P 处理大 0.088 ~ 0.609 mg/d、0.078 ~ 0.481 mg/d,但在 N2 下则相反,分别比 P 处理晚 0.232 d、小 0.103 mg/d 和 0.076 mg/d。

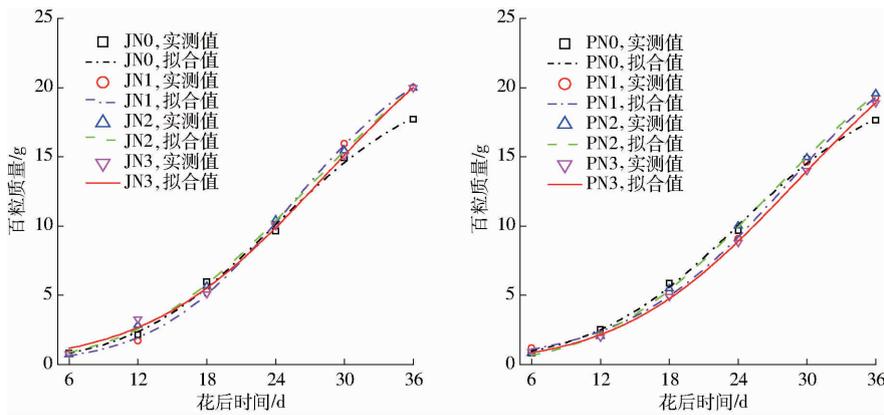


图1 不同地膜覆盖与施氮水平下夏玉米籽粒灌浆 Richards 拟合曲线

Fig. 1 Richards fitting curves of grain filling of summer maize under different film mulching and nitrogen fertilization rates

表2 不同处理下夏玉米籽粒灌浆特征参数

Tab. 2 Grain filling parameters of summer maize under different treatments

处理	R_0	t_{max}/d	$V_{max}/(mg \cdot d^{-1})$	$\bar{V}/(mg \cdot d^{-1})$
CK	0.198 ^d	22.769 ^e	8.462 ^f	5.676 ^c
JN0	0.223 ^c	23.637 ^f	7.986 ^e	5.382 ^f
JN1	0.216 ^c	25.149 ^d	9.729 ^b	6.543 ^b
JN2	0.482 ^b	20.226 ^h	11.115 ^a	7.540 ^a
JN3	0.163 ^e	28.212 ^b	8.859 ^d	5.956 ^{cd}
PN0	0.188 ^d	23.988 ^e	7.898 ^e	5.304 ^f
PN1	0.136 ^f	27.939 ^c	9.120 ^c	6.062 ^c
PN2	0.626 ^a	19.994 ⁱ	11.218 ^a	7.616 ^a
PN3	0.196 ^d	29.041 ^a	8.683 ^e	5.860 ^d

表3 不同处理下夏玉米籽粒灌浆特征参数的方差分析(P值)

Tab. 3 Analysis of variance (P value) for grain filling parameters under different treatments

处理	A	R_0	V_{max}	t_{max}	\bar{V}	T_1	\bar{V}_1	T_2	\bar{V}_2	T_3	\bar{V}_3
覆膜	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
施氮	<0.001	0.030	0.002	0.009	0.002	0.007	0.003	0.007	0.001	0.028	<0.001
覆膜×施氮	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.005	<0.001	<0.001	<0.001	0.005	<0.001	>0.05

2.2 不同地膜覆盖与施氮水平对夏玉米籽粒质量的影响

表1中的A为籽粒在灌浆结束时所能达到的最大百粒质量。覆膜对百粒质量无显著影响,而施氮对其影响极显著(表3),覆膜与施氮对百粒质量有极显著的交互作用($P < 0.01$)。地膜覆盖与施氮处理的夏玉米百粒质量均显著大于JN0、PN0处理,JN0大于PN0且均显著大于CK($P < 0.05$)。

相同施氮水平下,不同覆膜处理间差异显著($P < 0.05$),J处理的夏玉米百粒质量和P处理相比,分别增加1.39%、-1.69%、2.14%、-1.46%。可见,不同施氮水平下,J处理和P处理对夏玉米百粒质量影响不同:在N0、N2下,J处理比P处理更能促进百粒质量增加,但在N1、N3下,P处理比J处理更能促进百粒质量增加。

从施氮水平上看,N2处理的起始生长势最强,达到最大灌浆速率的时间最早,最大灌浆速率和平均灌浆速率均最大,平均分别为0.554、20.110 d、11.167 mg/d、7.578 mg/d。N0、N1、N3处理达到最大灌浆速率的时间晚于CK,且由小到大为N0、N1、N3,说明覆膜条件下施氮推迟了达到最大灌浆速率的时间,最大推迟了6.273 d,但适量施氮提前达到最大灌浆速率。N1、N3处理的最大灌浆速率和平均灌浆速率显著大于CK,N0处理则显著低于CK,且由大到小为N1、N3、N0,施氮对灌浆速率影响较大。可见,覆膜结合施氮可有效调控部分灌浆特征参数,优化灌浆过程,提高籽粒百粒质量。

在同种地膜覆盖下,N0处理的百粒质量最小,不同施氮处理间差异显著($P < 0.05$)。N1、N2、N3与N0相比,分别增加13.11%、43.14%、34.44%(J处理)和16.65%、42.09%、38.34%(P处理),JN2、PN2处理的百粒质量均最大,JN3、PN3次之。可见,地膜覆盖下适量施氮能明显增加玉米的百粒质量,而过量施氮后百粒质量反而降低。

2.3 不同地膜覆盖与施氮水平对夏玉米灌浆期各阶段参数的影响

表4为根据Richards模型拟合计算出的夏玉米灌浆期各阶段灌浆特征参数。从表3看出,覆膜无显著影响,施氮的影响达 $P < 0.01$ 水平(对 T_3 影响达 $P < 0.05$ 水平),覆膜和施氮的交互作用除对 \bar{V}_3 无显著影响外均达 $P < 0.01$ 水平。整体来说,与CK相比,除N2处理显著缩短灌浆渐增期外($P <$

0.05), 各处理均显著延长灌浆持续期, 提高了灌浆渐增期的灌浆速率, 施氮处理提高了灌浆快增期、缓增期灌浆速率。

表 4 不同处理下夏玉米籽粒灌浆各阶段持续时间及其灌浆速率

Tab.4 Duration and rate at each stage of grain filling of summer maize under different treatments

处理	$T_1/$ d	$\bar{V}_1/$ ($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$)	$T_2/$ d	$\bar{V}_2/$ ($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$)	$T_3/$ d	$\bar{V}_3/$ ($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$)
CK	14.512 ^f	2.625 ^e	16.514 ⁱ	7.400 ^e	22.208 ^h	2.051 ^c
JN0	14.380 ^g	2.388 ^d	18.513 ^e	6.966 ^f	26.694 ^e	1.913 ^d
JN1	16.614 ^d	2.503 ^{cd}	17.068 ^h	8.498 ^b	23.834 ^g	2.343 ^b
JN2	10.463 ⁱ	3.219 ^a	19.526 ^c	9.633 ^a	32.729 ^b	2.599 ^a
JN3	17.083 ^c	2.923 ^b	22.257 ^h	7.738 ^d	30.928 ^d	2.135 ^c
PN0	14.866 ^e	2.549 ^e	18.243 ^f	6.903 ^f	24.930 ^f	1.909 ^d
PN1	19.034 ^a	2.928 ^b	17.810 ^g	8.005 ^c	21.434 ⁱ	2.254 ^b
PN2	10.495 ^h	2.918 ^b	18.997 ^d	9.711 ^a	32.645 ^e	2.614 ^a
PN3	17.365 ^b	2.545 ^{cd}	23.354 ^a	7.567 ^d	34.562 ^a	2.071 ^c

灌浆渐增期持续时间均为 N2 处理最短, N0 次之, 且 J 处理显著短于 P 处理, 灌浆速率随施氮水平提高逐渐增大, 且 P 处理大于 J 处理。J、P 处理的灌浆持续时间和灌浆速率在灌浆快增期、缓增期表现相同, 灌浆持续时间均为 N1 最短, N0 次之, 灌浆速率由大到小为 N2、N1、N3、N0。灌浆快增期, 在 N0、N2 下, P 处理的灌浆持续时间显著短于 J 处理, N1、N3 下则相反, 到灌浆缓增期时只有 N3 处理下 J 处理显著短于 P 处理。灌浆快增期、缓增期灌浆速率在 N0、N1、N3 下均为 J 处理大于 P 处理, N2 下则相反。可见, 与氧化-生物降解膜相比, 普通地膜覆盖主要延长灌浆前期持续时间, 并提高灌浆速率。随着灌浆进程推进, 氧化-生物降解膜延长灌浆持续时间和提高灌浆速率的作用逐渐凸显; 施氮水平主要影响灌浆快增期、缓增期, 适宜施氮水平有利于延长灌浆持续时间, 提高灌浆速率, 但过高会适得其反。

2.4 不同地膜覆盖与施氮水平对夏玉米灌浆期叶绿素 a/b 的影响

叶绿素是植物光合作用中最重要色素, 叶绿素含量的多少直接影响叶片进行光合作用。叶绿素 a/b 的比值前期高, 后期低, 既能增加光合产物, 又能延长叶片的功能期, 从而积累较多的有机物质, 获得较高的产量^[22]。不同地膜覆盖与施氮水平对夏玉米穗位叶叶绿素 a/b 比值的影响如图 2 所示, 不同处理下穗位叶叶绿素 a/b 比值变化趋势大致相同。由图 2a 分析可知, JN0、JN1、JN2、JN3 的叶绿素 a/b 均值分别为 3.118、3.118、3.046 和 3.023。叶绿素 a/b 比值达到最大分别为花后 24、18、12、18 d, 晚于或与 CK (花后 12 d) 同期, 且在花后 12~30 d 维持较高水平, 而 CK 的叶绿素 a/b 比值在花后 18 d 显著下降 ($P < 0.05$)。达到最大值前、后的叶绿素 a/b 均值分别为 3.143、3.112、3.038、3.012 和 3.067、3.123、3.050、3.034。叶绿素 a/b 均值和叶绿素 a/b 比值达到最大值前、后的叶绿素 a/b 均值在 N0、N1 处理下均显著大于 N2、N3 处理 ($P < 0.05$), 且 N2 显著大于 N3 处理, CK 介于 N1 和 N2 之间。

由图 2b 分析可知, PN0、PN1、PN2、PN3 叶绿素 a/b 均值分别为 3.111、3.108、3.032 和 3.053。叶绿素 a/b 比值达到最大时 N0、N1 处理均为花后 18 d, N2、N3 处理均为花后 24 d, 均晚于 CK (花后 12 d), 且在花后 12~30 d 维持较高水平。达到最大值前、后的叶绿素 a/b 均值分别为 3.140、3.161、3.057、3.080 和 3.083、3.055、2.981、2.998。叶绿素 a/b 均值和叶绿素 a/b 比值达到最大值前的叶绿素 a/b 均值在 N0、N1 处理下均显著大于 N2、N3 处理 ($P < 0.05$), 与 J 处理结果相似, 但 N3 显著大于 N2 处理, 叶绿素 a/b 比值达到最大值后仍存在上述规律, 但各处理间差异的显著性降低。

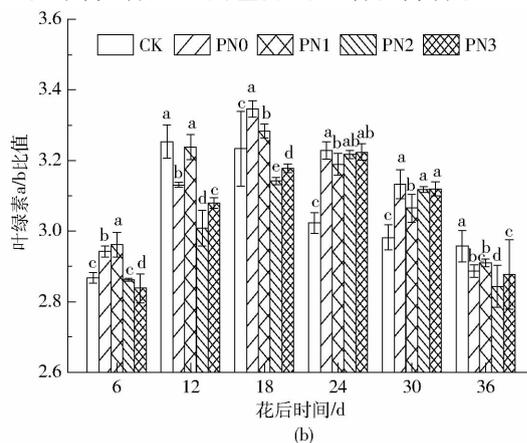
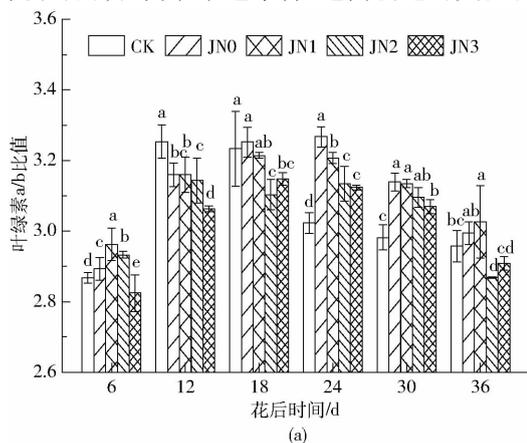


图 2 不同地膜覆盖与施氮水平对夏玉米穗位叶叶绿素 a/b 的影响

Fig.2 Effect of different film mulching and nitrogen fertilization rate on chlorophyll a/b value in ear positions of summer maize

可见,两种地膜覆盖下,高施氮水平有利于穗位叶吸收短波光,延迟了光合活性达到最大值的时间,但延长了光合活性持续时间。

3 讨论

3.1 灌浆特征参数、各阶段参数

灌浆期是决定玉米产量和品质的重要阶段。关于灌浆特征参数与籽粒质量的关系,孟兆江等^[23]认为,最大灌浆速率和平均灌浆速率与籽粒质量呈显著相关,本研究也得出相似结论。本研究中两种地膜覆盖下,随施氮水平的提高,达到最大灌浆速率时间相应延迟,最大灌浆速率和平均灌浆速率增大,灌浆结束时百粒质量也得到提高,施氮为N2水平时,达到最大灌浆速率时间最短,最大灌浆速率、平均灌浆速率和百粒质量也最大。说明一定范围内随施氮水平的提高,延迟了达到最大灌浆速率时间,而适宜的施氮水平缩短了达到最大灌浆速率时间,与曹彩云等^[24]的研究结果不尽相同,可能是因为施肥方式不同。施氮提高了最大灌浆速率和平均灌浆速率,从而提高百粒质量,而过高施氮水平下的最大灌浆速率和平均灌浆速率有所降低,与吴清丽等^[25]的研究结果一致。

籽粒发育早期所形成的库容潜力大小对最终粒质量的获得非常重要^[26]。本研究发现,氧化-生物双降解地膜覆盖配施氮肥有利于提高籽粒起始生长势,起始生长势与籽粒质量无显著相关关系,与达到最大灌浆速率时间和灌浆速率存在一定的相关性。两种地膜覆盖下,N0的起始生长势高于N1,但达到最大灌浆速率时间晚于N1,最大灌浆速率和平均灌浆速率小于N1,灌浆结束时百粒质量也低于N1;JN2和PN2处理的起始生长势最高,最早达到最大灌浆速率,最大灌浆速率和平均灌浆速率最大,灌浆结束时百粒质量也最大;N3的起始生长势低于N2,达到最大灌浆速率时间晚于N2,最大灌浆速率和平均灌浆速率小于N2,灌浆结束时百粒质量也低于N2。氧化-生物双降解地膜和普通地膜覆盖下,起始生长势随施氮水平变化由大到小分别为N2、N0、N1、N3,N2、N3、N0、N1,起始生长势高的较早达到最大灌浆速率,渐增期(T_1)也较短,是因为施氮不足会造成氮胁迫,施氮过量会抑制生长,影响作物生育进程。地膜覆盖配施氮肥通过起始生长势,影响胚乳细胞分裂,调控籽粒进入灌浆的时间,而影响达到最大灌浆速率时间和灌浆速率,但起始生长势与达到最大灌浆速率时间和灌浆速率存在何种相关性有待进一步探索研究。

籽粒灌浆进程可分为渐增期(T_1)、快增期(T_2)

和缓增期(T_3)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。魏亚萍等^[27]认为籽粒质量主要决定于籽粒的灌浆持续时间和灌浆速率,李秀君等^[28]认为灌浆过程持续时间、灌浆速率与粒质量呈显著相关。本研究中两种地膜覆盖下,在 T_1 中,N2处理下最短,N0次之,且J处理显著短于P处理, \bar{V}_1 随施氮水平提高逐渐增大,且P处理大于J处理;两种地膜覆盖的 T_2 、 \bar{V}_2 和 T_3 、 \bar{V}_3 表现出相同的变化趋势,在 T_2 、 T_3 中,N1下最短,N0次之。在 T_2 中,N0、N2下,P处理的灌浆持续时间显著短于J处理,N1、N3下则相反,到 T_3 时N3处理下J处理显著短于P处理, T_2 、 T_3 中灌浆速率在N0、N1、N3下均为J处理大于P处理,N2下则相反。本研究各处理灌浆的3个阶段持续时间由小到大均为渐增期、快增期、缓增期,与武文明等^[29]结果一致;各阶段平均灌浆速率由小到大均为 \bar{V}_3 、 \bar{V}_1 、 \bar{V}_2 ,与李伟等^[30]得出的施氮籽粒灌浆启动较快,灌浆活跃期延长结论相似。普通地膜覆盖主要延长灌浆渐增期持续时间,并提高灌浆速率,由于氧化-生物双降解地膜发生裂口降解,改善了土壤通气条件,协调土壤水热平衡,随着灌浆进程的推进,其延长灌浆持续时间和提高灌浆速率的作用逐渐显现;覆膜配施氮肥主要影响灌浆快增期、缓增期,适宜施氮水平有利于延长灌浆持续时间,提高相应灌浆速率,与李伟等^[30]结论一致,而延长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^[31]。

3.2 叶绿素 a/b

叶绿素 a/b 值是影响光合功能的重要生理指标,较高的叶绿素 a/b 值有利于吸收低温季节的长波光,较低的叶绿素 a/b 值有利于吸收夏季的短波光^[22]。本研究中两种地膜覆盖下,不同施氮水平的叶绿素 a/b 值与灌浆期各阶段的灌浆速率变化趋势相似,都呈单峰变化,与关义新等^[32]结果一致。花后 6 d 和 36 d 较低,前者是因为开花初始玉米由营养生长阶段向生殖生长阶段转换,后者是因为叶片衰老所致。氧化-生物双降解地膜覆盖下的叶绿素 a/b 均值在 3.023 ~ 3.118,叶绿素 a/b 比值达到最大为花后 12 ~ 24 d,在花后 12 ~ 30 d 维持较高水平,且 N2、N3 处理始终小于 N0、N1 处理;普通地膜覆盖下的叶绿素 a/b 均值分别为 3.032 ~ 3.111,叶绿素 a/b 比值达到最大为花后 18 ~ 24 d,N2、N3 处理均为花后 24 d,在花后 12 ~ 30 d 维持较高水平,且 N2、N3 处理在花后 12 ~ 18 d 始终小于 N0、N1 处理,在花后 24 ~ 30 d 则与 N0、N1 处理相近。说明氧化-生物双降解地膜和普通地膜覆盖配施氮肥提高了

灌浆期叶绿素 a/b 值,且在灌浆快增期维持较高水平,延长光合活性持续时间,高施氮水平(N₂、N₃)的叶绿素 a/b 值低于低施氮水平(N₀、N₁),有利于穗位叶吸收短波光进行光合作用,并向籽粒转移光合产物,从而提高籽粒质量。

4 结论

(1)一定范围内随施氮水平的提高,达到最大灌浆速率的时间延迟,但最大灌浆速率和平均灌浆速率提高。氧化-生物双降解地膜覆盖配施氮肥有利于提高籽粒起始生长势,调控籽粒进入灌浆的时间,从而影响达到最大灌浆速率时间和灌浆速率。

(2)地膜覆盖配施氮肥主要影响灌浆快增期、缓增期,延长了灌浆快增期和缓增期持续时间,并提高了快增期和缓增期的平均灌浆速率。两种地膜覆

盖相比较,普通地膜覆盖主要延长灌浆渐增期持续时间,并提高灌浆速率,氧化-生物双降解地膜延长灌浆持续时间和提高灌浆速率的作用在快增期和缓增期逐渐显现。

(3)地膜覆盖配施氮肥提高灌浆期叶绿素 a/b 值,延长了光合活性持续时间,有利于提高籽粒质量。两种地膜覆盖均延迟了光合活性达到最大值的时间。

(4)JN₂ 和 PN₂ 处理的夏玉米较早启动灌浆期,缩短灌浆渐增期,延长灌浆快增期和缓增期,提高最大灌浆速率、平均灌浆速率和各阶段平均灌浆速率,提高光合作用效率,有利于提高籽粒质量,是本试验中地膜覆盖和施氮水平的最佳组合,从环境保护和农业可持续发展角度考虑,JN₂ 处理为更合理、有效和环保的组合方式。

参 考 文 献

- 张德奇,廖允成,贾志宽. 旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(1):208-213. ZHANG Deqi, LIAO Yuncheng, JIA Zhikuan. Research advances and prospects of film mulching in arid and semi-arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 208-213. (in Chinese)
- 申丽霞,王璞,张丽丽. 可降解地膜对土壤、温度水分及玉米生长发育的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(6):25-30. SHEN Lixia, WANG Pu, ZHANG Lili. Effects of degradable film on soil temperature, moisture and growth of maize [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 25-30. (in Chinese)
- SUI J, WANG J, GONG S, et al. Assessment of maize yield-increasing potential and optimum N level under mulched drip irrigation in the Northeast of China[J]. Field Crops Research, 2018, 215: 132-139.
- ZHAO H, XIONG Y, LI F, et al. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture-temperature improvement in a semi-arid agroecosystem[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104(2): 68-78.
- 谷晓博,李援农,银敏华,等. 降解膜覆盖对油菜根系、产量和水分利用效率的影响[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(12):184-193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151225&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.025.
- GU Xiaobo, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Effects of biodegradable film mulching on root distribution, yield and water use efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 184-193. (in Chinese)
- 汪景宽,刘顺国,李双异. 长期地膜覆盖及不同施肥处理对棕壤无机氮和氮素矿化率的影响[J]. 水土保持学报,2006,20(6):107-110. WANG Jingkuan, LIU Shunguo, LI Shuangyi. Effect of long-term plastic film mulching and fertilization on inorganic N distribution and organic N mineralization in brown earth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 107-110. (in Chinese)
- 董合干,刘彤,李勇冠,等. 新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(8):91-99. DONG Hegan, LIU Tong, LI Yongguan, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 91-99. (in Chinese)
- YANG N, SUN Z X, FENG L S, et al. Plastic film mulching for water-efficient agricultural applications and degradable films materials development research[J]. Advanced Manufacturing Processes, 2015, 30(2): 143-154.
- 杨玉姣,黄占斌,闫玉敏,等. 可降解地膜覆盖对土壤水温和玉米成苗的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(增刊1):10-14. YANG Yujiao, HUANG Zhanbin, YAN Yumin, et al. Effects on temperature and moisture of soil and seeding of maize to biodegradable film coverage[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(Suppl. 1): 10-14. (in Chinese)
- 申丽霞,王璞,张丽丽. 可降解地膜的降解性能及对土壤温度、水分和玉米生长的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(4):111-116. SHEN Lixia, WANG Pu, ZHANG Lili. Degradation property of degradable film and its effects on soil temperature and moisture and maize growth[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 111-116. (in Chinese)
- LI R, HOU X, JIA Z, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116(1): 101-109.
- LIU C, LI F, ZHOU L, et al. Effects of water management with plastic film in a semi-arid agricultural system on available soil carbon fractions[J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 57(7): 9-12.
- 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 Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, 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. (in Chinese)
- 14 李潮海, 刘奎, 周苏政, 等. 不同施肥条件下夏玉米光合对生理生态因子的响应[J]. *作物学报*, 2002, 28(2): 265 – 269.
LI Chaohai, LIU Kui, ZHOU Sumei, et al. Response of photosynthesis to eco-physiological factors of summer maize on different fertilizer amounts[J]. *Acta Sgronomica Sinica*, 2002, 28(2): 265 – 269. (in Chinese)
- 15 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, 9(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, 9(2): 47 – 49. (in Chinese)
- 16 王佳慧, 高震, 曲令华, 等. 氮肥后移对滴灌夏玉米源库特性及产量形成的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(8): 1 – 8.
WANG Jiahui, GAO Zhen, QU Linghua, et al. Effects of postponing N-fertilizer application by drip fertigation on the characteristics of source-sink and yield formation in summer maize [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(8): 1 – 8. (in Chinese)
- 17 王立静, 马丰刚, 蒋明洋, 等. 不同玉米品种籽粒灌浆脱水特性研究[J]. *山东农业科学*, 2016, 48(7): 48 – 50.
WANG Lijing, MA Fenggang, JIANG Mingyang, et al. Grain filling and dehydration characteristics of different maize hybrids[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(7): 48 – 50. (in Chinese)
- 18 卫晓轶, 魏锋, 洪德峰, 等. 不同耕作方式对夏玉米灌浆及产量性状的影响[J]. *河南农业科学*, 2013, 42(8): 21 – 23.
WEI Xiaoyi, WEI Feng, HONG Defeng, et al. Effect of tillage system on grain filling and yield traits of summer maize[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(8): 21 – 23. (in Chinese)
- 19 朱庆森, 曹显祖, 骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析[J]. *作物学报*, 1988, 14(3): 182 – 193.
ZHU Qingsen, CAO Xianzu, LUO Yiqi. Growth analysis on the process on grain filling in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1988, 14(3): 182 – 193. (in Chinese)
- 20 王超, 张兵涛, 王文秀. 小麦叶片叶绿素的提取及其稳定性研究[J]. *湖南农业科学*, 2012(23): 38 – 41.
WANG Chao, ZHANG Bingtao, WANG Wenxiu. Extraction of chlorophyll from wheat leaf and its stability[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012(23): 38 – 41. (in Chinese)
- 21 RICHARDS F J. A flexible growth function for empirical use[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1959, 10(2): 290 – 301.
- 22 牛立元, 茹振钢, 赵花周, 等. 小麦叶片叶绿素含量系统变化规律研究[J]. *麦类作物学报*, 1999, 19(2): 36 – 38.
- 23 孟兆江, 孙景生, 段爱旺, 等. 调亏灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆特征及其模拟模型[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 18 – 23.
MENG Zhaojiang, SUN Jingsheng, DUAN Aiwang, et al. Grain filling characteristics of winter wheat with regulated deficit irrigation and its simulation models[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 18 – 23. (in Chinese)
- 24 曹彩云, 李科江, 崔彦宏, 等. 长期定位施肥对夏玉米子粒灌浆影响的模拟研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 48 – 53.
CAO Caiyun, LI Kejiang, CUI Yanhong, et al. Modeling the effect of long-term fertilization on grain filling of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1): 48 – 53. (in Chinese)
- 25 吴清丽, 高茂盛, 廖允成, 等. 氮素对冬小麦光合物质贮运及籽粒灌浆进程的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 120 – 124.
WU Qingli, GAO Maosheng, LIAO Yuncheng, et al. Effect of nitrogen application on accumulation and transportation of photoassimilation and grain filling course[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 120 – 124. (in Chinese)
- 26 王璞, 魏亚萍, 陈才良. 玉米子粒库容潜力研究进展[J]. *玉米科学*, 2002, 10(1): 46 – 49.
WANG Pu, WEI Yaping, CHEN Cailiang. Progress on study of potential sink capacity in maize[J]. *Journal of Maize Science*, 2002, 10(1): 46 – 49. (in Chinese)
- 27 魏亚萍, 王璞, 陈才良. 关于玉米粒重的研究[J]. *植物学通报*, 2004, 21(1): 37 – 43.
WEI Yaping, WANG Pu, CHEN Cailiang. Studies on the grain weight in maize[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2004, 21(1): 37 – 43. (in Chinese)
- 28 李秀君, 潘宗东. 不同粒重小麦品种子粒灌浆特性研究[J]. *中国农业科技导报*, 2005, 7(1): 26 – 30.
LI Xiujun, PAN Zongdong. A study on the grain-filling characteristic of different weight wheat[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2005, 7(1): 26 – 30. (in Chinese)
- 29 武文明, 王世济, 陈洪俭, 等. 氮肥运筹对苗期受渍夏玉米子粒灌浆特性和产量的影响[J]. *玉米科学*, 2016, 24(6): 120 – 125.
WU Wenming, WANG Shiji, CHEN Hongjian, et al. Effects of nitrogen fertilization on grain filling characteristics in summer maize under waterlogging at the seedling stage[J]. *Journal of Maize Science*, 2016, 24(6): 120 – 125. (in Chinese)
- 30 李伟, 李絮花, 李海燕, 等. 控释尿素与普通尿素混施对夏玉米产量和氮肥效率的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(4): 699 – 706.
LI Wei, LI Xuhua, LI Haiyan, et al. Effects of different mixing rates of controlled-release urea and common urea on grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 699 – 706. (in Chinese)
- 31 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)
- 32 关义新, 林葆, 凌碧莹. 光氮互作对玉米叶片光合色素及其荧光特性与能量转换的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(2): 152 – 158.
GUAN Yixin, LIN Bao, LING Biying. Interaction effects of light density and nitrogen on maize leaf pigments, chlorophyll II fluorescence and energy transition[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(2): 152 – 158. (in Chinese)