

DOI: 10.11686/cyxb2018493

<http://cyxb.magtech.com.cn>

孙仕军, 姜浩, 陈志君, 等. 不同颜色地膜覆盖下春玉米主要生长性状对耕层积温的响应. 草业学报, 2019, 28(2): 61—72.

Sun S J, Jiang H, Chen Z J, *et al.* Effects of surface-layer accumulated temperature on major growth traits of spring maize when un-mulched or under clear or black plastic film mulches. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(2): 61—72.

不同颜色地膜覆盖下春玉米主要 生长性状对耕层积温的响应

孙仕军, 姜浩, 陈志君, 朱振闯, 张旭东*, 迟道才

(沈阳农业大学水利学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要:为了探讨东北雨养区不同颜色地膜覆盖下春玉米主要生长性状和产量对耕层积温的响应规律, 设置了无色透明膜(M_1)、黑膜(M_2)和露地对照(M_0)田间试验。根据 2016 和 2017 两年数据, 应用 Slogistic 方程拟合了不同颜色地膜覆盖下玉米株高、成熟期之前叶面积指数以及干物质累积随耕层积温变化动态, 通过逐步回归分析探讨了玉米干物质累积的 Slogistic 曲线特征量与产量关系。研究表明: 1) 玉米株高渐增期的平均生长速率大小表现为 $M_2 > M_1 > M_0$, 在快增期表现为 $M_2 > M_0 > M_1$, 缓增期表现为 $M_0 > M_2 > M_1$; 2) 玉米叶面积指数渐增期和缓增期平均增长速率表现与株高一致, 快增期则表现为 $M_2 > M_1 > M_0$, 黑膜处理下叶面积指数和最大增加速率最高, 无色透明膜处理次之; 3) 黑膜处理显著增加了快增期干物质累积持续时间, 并且较无色透明地膜和露地处理率先进入干物质累积快增期, 这有助于提高玉米产量; 4) 干物质累积最大速率、干物质累积曲线拐点等特征量与产量密切相关, 达到极显著水平($P < 0.01$)。研究认为, 地膜覆盖对玉米生长渐增期影响较大, 其中无色透明膜加速玉米衰老; 黑膜处理下干物质累积最大, 产量最高, 玉米生长更稳定。对玉米生长性状和产量的研究, 可用于玉米生产管理决策中作物生长路线的设计, 能够为提高玉米生产管理水平提供决策依据。

关键词:耕层积温; Slogistic; 地膜覆盖; 雨养农业; 春玉米

* Effects of surface-layer accumulated temperature on major growth traits of spring maize when un-mulched or under clear or black plastic film mulches

SUN Shi-jun, JIANG Hao, CHEN Zhi-jun, ZHU Zhen-chuang, ZHANG Xu-dong*, CHI Dao-cai

College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

Abstract: The objective of this research was to study the effects of surface-layer accumulated temperature on major growth traits of spring maize under different colored plastic film mulching in the rain-fed region of North-east China. Field experiments with three film mulching treatments: no mulch (M_0), colorless transparent plastic film mulch (M_1) and black plastic film mulch (M_2), were conducted. Slogistic equation was used to fit the progression of maize plant height, leaf area index, and dry matter accumulation as a function of surface-layer accumulated temperature. It was found that the average rate of maize plant height increase ranked $M_2 > M_1 > M_0$ during early growth, $M_2 > M_0 > M_1$ during stem elongation, and $M_0 > M_2 > M_1$ during grain development. The treatment rankings for accumulation rate of maize leaf area index followed those of plant height during early growth and grain development stages, but ranked $M_2 > M_1 > M_0$ during stem elongation. The black film (M_2)

* 收稿日期: 2018-07-18; 改回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (SQ2018YFD030062), 辽宁省自然科学基金项目 (20180550617) 和国家留学基金资助项目 (201308210026) 资助。

作者简介: 孙仕军 (1969-), 男, 辽宁大连人, 副教授, 博士。E-mail: sunshijun2000@yeah.net

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zxxddd@126.com

treatment significantly increased the duration of dry matter accumulation during the stem elongation stage and reached the stem elongation growth phase earlier than other treatments, and so contributed to improved maize yield. There was a significant relationship between maximum dry matter accumulation rate, the accumulated temperature at which the inflexions of the dry matter accumulation curves occurred, other parameters of the Slogistic equation, and maize yield. The results show that film mulching had the greatest impact on maize development during the early growth stage. Transparent plastic film accelerated leaf senescence, while the black plastic film treatment had the largest dry matter accumulation rate and the highest yield. Results from this research into the effect of mulching treatment options on the growth dynamics of maize and on maize yield can be used to improve resource use efficiency and output of maize production systems.

Key words: surface-layer accumulated temperature; Slogistic; plastic film mulching; rain-fed agriculture; spring maize

玉米(*Zea mays*)是我国第一大农作物,东北地区是中国商品玉米生产的主要基地,玉米的种植面积约占总粮食作物的70%,其中90%依靠雨养。东北雨养区近年来春季冷空气活动频繁,气候逐步呈现出暖干化趋势,经常发生干旱农业^[1],其中春旱是影响玉米生产的主要原因之一,对玉米苗期和根系发育产生严重影响。地膜覆盖农业措施可以改善土壤水热条件,有效缓解春旱,提高玉米出苗率。但是,对于地膜颜色的选择说法不一,仍是需研究的问题。Liu等^[2]研究了中国黄土高原区覆膜对春玉米产量的影响,2013年无色透明膜处理产量最高,但在2014年黑膜处理产量最高。无论何种颜色地膜覆盖均会改善田间土壤水热状况^[3-5],然而黑膜对田间杂草的防治效果优于无色透明膜^[6],但是无色透明膜的透光性远优于黑膜,对土壤耕层温度影响程度也不同于黑膜。因此本研究以不同颜色地膜覆盖作为试验处理,探索适合研究区域的地膜颜色。

Logistic方程作为一种S型生长曲线(Slogistic模型),被广泛地用于玉米、小麦(*Triticum aestivum*)、棉花(*Gossypium* spp.)、西葫芦(*Cucurbita pepo*)等作物的模拟,可以定量的描述作物株高、叶面积指数以及干物质累积等方面。王玲等^[7]研究发现 Logistic 及其扩充模型可以较好地模拟不同地理位置、不同品种以及不同播种时间的玉米叶面积生长。张旭东等^[8]利用 Logistic 修正式分析了黄土区玉米叶面积指数随出苗天数变化情况,从而可以确定最大叶面积指数出现日期,并建立气积温与叶面积指数的归一化模型。张银锁等^[9]利用 Logistic 曲线模拟夏玉米干物质累积过程,发现环境适宜时干物质累积遵循经典的 Logistic 生长曲线,但存在胁迫(温度、水分、盐分等)时曲线会出现不规则的多峰变化。赵姣等^[10]通过 Logistic 模型分析了冬小麦干物质累积特征对产量的影响。Sepaskhah等^[11]利用 Logistic 模型定量分析水氮管理条件对玉米干物质累积和产量的影响,并且建立预测玉米干物质累积和产量的经验模型。目前基于气积温研究作物生长较多,但是实践证明,作物根系的生命活动、生理生化过程、摄取水分和养分的速率都与土壤温度有关,并且土壤温度也影响空气温度,另外在研究区域,不同颜色地膜覆盖处理下的气积温都是相同的,所以仅用气积温的概念来解释不同处理条件下玉米生长状况是不可行的,而用耕层积温的概念来进行研究,就比较清楚,另外用积温等生态因素变量代替时间变量作为衡量玉米生长发育过程的时间标尺比用天数更具有代表性,可以从根本上反映玉米的生长状况^[12]。

本研究以有效耕层积温为自变量,分别以株高、叶面积指数和干物质累积为因变量建立 Slogistic 模型,研究玉米生育期生长动态,建立了产量与干物质累积 Slogistic 模型特征量的关系模型。通过拟合曲线和曲线特征点,分别研究了不同处理条件下玉米的生长指标在渐增期、快增期和缓增期的耕层积温区间,从而确定了3个生长阶段的日期,比较了各生长阶段生长指标的平均增长速率、持续时间、最大生长速率和出现的时期等信息,还研究了各生育阶段各生物量随耕层积温升高的变化情况,以期为东北地区玉米稳产高产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2016和2017年在沈阳农业大学水利学院综合试验场进行,该试验场位于沈阳市东部,N 41°44',E

123°27′, 海拔 44.7 m, 属于温带大陆性季风气候, 春季气温回升迅速但是不稳定, 夏季则高温多雨, 秋季气温下降较快, 冬季寒冷干燥, 雨热同期。全年雨量较为充足, 主要集中在 5—9 月, 5—9 月降水量占全年降水量的 79%。其中 2016 年生育期内降水量为 789.6 mm, 2017 年生育期内降水量为 301.5 mm, 玉米生育期内月平均最高温为 31.2 ℃, 月平均最低温为 12.8 ℃, 全年平均活动积温为 3258.8 ℃·d, 有效积温($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)为 2530.1 ℃·d。平均日照时数为 2743 h, 光热资源丰富, 日照时数长, 昼夜温差大, 较适宜玉米生长。

表 1 2016 和 2017 年不同处理玉米灌浆末期与收获时有效耕层积温
Table 1 Effective surface-layer accumulated temperature of maize under different treatments at the end of milking stage and harvest in 2016 and 2017 (℃·d)

时期 Period	2016-05-01—2016-09-27			2017-05-03—2017-09-23		
	黑膜 Black film (M ₂)	无色透明膜 Colorless transparent film (M ₁)	露地 No-mulch (M ₀)	黑膜 Black film (M ₂)	无色透明膜 Colorless transparent film (M ₁)	露地 No-mulch (M ₀)
T _{灌浆} T _{grain filling}	1842.6	2021.9	1737.8	1788.9	1912.0	1715.1
T _{收获} T _{harvest}	2254.3	2557.2	2037.9	2144.3	2314.6	2083.9

1.2 试验设计

试验采用传统的大垄双行种植方式(垄台宽 40 cm, 沟宽 80 cm), 以良玉 99 玉米为试验材料, 采用单因素完全随机试验设计, 设置 3 种处理, 分别为黑膜(M₂)、无色透明膜(M₁)和露地(M₀), 每种处理 3 个重复(表 1), 共 9 个试验小区, 每个试验小区的面积为 23.4 m²(6.0 m×3.9 m), 小区四周设置保护行, 不同处理之间设置隔离行, 各处理下种植密度均为 75000 株·hm⁻²。播种时一次施基肥 1000 kg·hm⁻²(N、P₂O₅ 和 K₂O 含量分别为 27%, 15%和 13%), 生育期内不再进行追肥, 试验期内依靠自然降水, 田间管理措施与当地农户种植一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 地温测定 土壤耕层温度通过曲管地温计, 从播种至玉米成熟, 每天 8:00、14:00、18:00 定时观测土壤 5、10、15、20、25 cm 处温度。

1.3.2 气象数据 采用试验场内气象监测仪进行检测。

1.3.3 玉米株高测定 每个小区选取长势均匀的 3 株玉米, 每隔 15 d 用卷尺进行测量, 并做标记。

1.3.4 叶面积指数 选取长势均匀的 5 株玉米并做标记, 每隔 15 d 采用人工测量的方法利用钢尺测量选定植株上的所有有效叶片的长和宽, 计算每个试验小区单位面积上的叶面积, 并利用长宽系数法推求叶面积指数^[13]。

1.3.5 干物质累积测定 干物质在每个生育期末测一次, 成熟期加测 1 次, 每个小区选出 3 株有代表性的植株, 从茎基部砍下装袋, 放入烘箱杀青(105 ℃)30 min, 然后恒温(80 ℃)烘干至恒质量, 用天平(精度为 0.01 g)测定干物质生物量。

1.3.6 产量测定 每个小区单独收获计产(除去取样植株所占面积), 并随机选取 10 m²进行测产, 最终折算为 14%含水量的籽粒产量(kg·hm⁻²)。

1.4 耕层有效积温计算

根据《作物栽培学》关于玉米的叙述^[14], 对于沈阳地区的春玉米来说, 玉米生物学零度 $B=8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 玉米生长下限温度 $T_{\text{base}}=8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 生长上限温度 $T_{\text{upper}}=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。耕层有效积温计算如下^[15]:

$$T = \sum_{i=1}^n (T_i - B) \tag{1}$$

$$T_i = \frac{(T_x^* + T_n^*)}{2} \tag{2}$$

式中: T_i 为平均温度; T_x^* 为适宜的最高温度; T_n^* 为适宜的最低温度。取值如下:

$$\begin{cases} T_x^* = T_{\text{upper}} & T_x^* \geq T_{\text{upper}} \\ T_x^* = T_{\text{base}} & T_x^* \leq T_{\text{base}} \\ T_x^* = T_x & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_n^* = T_{\text{upper}} & T_n^* \geq T_{\text{upper}} \\ T_n^* = T_{\text{base}} & T_n^* \leq T_{\text{base}} \\ T_n^* = T_n & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

1.5 Slogistic 方程参数及关键点推求

1.5.1 生长模型通式 不同颜色地膜覆盖处理和露地玉米出苗后,生长量($Y, \text{cm}, \text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2}, \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)随 $5 \sim 25 \text{ cm}$ 耕层积温($T, ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)增加呈现“缓慢增长—快速增长—缓慢增长”的趋势,可以用 Slogistic 方程拟合,其一般通式为^[16]:

$$Y = \frac{a}{1 + be^{-kT}} \quad (5)$$

式中: a 为一定环境条件下玉米单株生长量的上限; b, k 为待定系数。

1.5.2 生物量累积速率方程和曲线的拐点 对式(5)进行求导,整理得:

$$\frac{dY}{dT} = \frac{abke^{-kT}}{(1 + be^{-kT})^2} \quad (6)$$

该方程为生物量累积速率方程,是一个连续变化的单峰曲线,曲线的峰值即为增长速率的最大值,对(6)式进行求一阶导,并令其等于 0,即可求出最大增长速率 V_{max} 和此时对应的耕层积温 T_g ,计算公式如下:

$$V_{\text{max}} = \frac{ak}{4} \quad (7)$$

$$T_g = \frac{\ln b}{k} \quad (8)$$

1.5.3 曲线两个特征点的确定 对式(5)进行二阶求导,并令其等于 0,就可以求出生长曲线上的两个突变拐点,即 Y 最大生长阶段对应的积温区间(T_s, T_h),计算公式如下:

$$\begin{cases} T_s = \frac{\ln b - \ln(2 + \sqrt{3})}{k} \\ T_h = \frac{\ln b - \ln(2 - \sqrt{3})}{k} \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_s, T_h 为玉米生长量随耕层积温变化模式的两个特征值,分别对应玉米生长量随耕层积温增加从缓慢增长转为迅速增长和从迅速增长转为缓慢增长的耕层积温值。在 T_s 之前和 T_h 之后玉米生物量累计缓慢,其中在 T_s 之前为渐增期,在 T_h 之后至收获结束为缓增期,在 T_s 和 T_h 之间,生物量累积迅速, Y 与 T 之间基本上呈线性关系,为群体的旺盛生长期,称为快增期。由 T_s, T_h 还可以求出最大生长时段的平均生长速率。

$$V = \frac{K}{\sqrt{3}(T_h - T_s)} \quad (10)$$

1.6 数据处理

采用 Excel 分析数据,用 Origin 2016 对数据进行拟合以及绘图,用 DPS 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理下玉米株高随耕层积温变化动态

根据 2016 和 2017 年株高实测数据,对不同处理下的株高进行非线性拟合,得到两年不同颜色地膜覆盖处理下株高拟合曲线如图 1 所示。经比较分析,2017 年玉米株高随耕层积温变化动态规律和 2016 年一致,以下通过 2016 年玉米株高随耕层积温变化动态情况为例进行说明。

由表 2 可知, M_0, M_1, M_2 处理玉米株高渐增期的耕层积温区间分别为 $0 \sim 652.8 ^\circ\text{C} \cdot \text{d}, 0 \sim 692.8 ^\circ\text{C} \cdot \text{d}, 0 \sim 645.7 ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,在玉米株高渐增期,耕层积温每增加 $10 ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,植株平均分别增高 $0.91, 0.92, 1.02 \text{ cm}$,平均生长

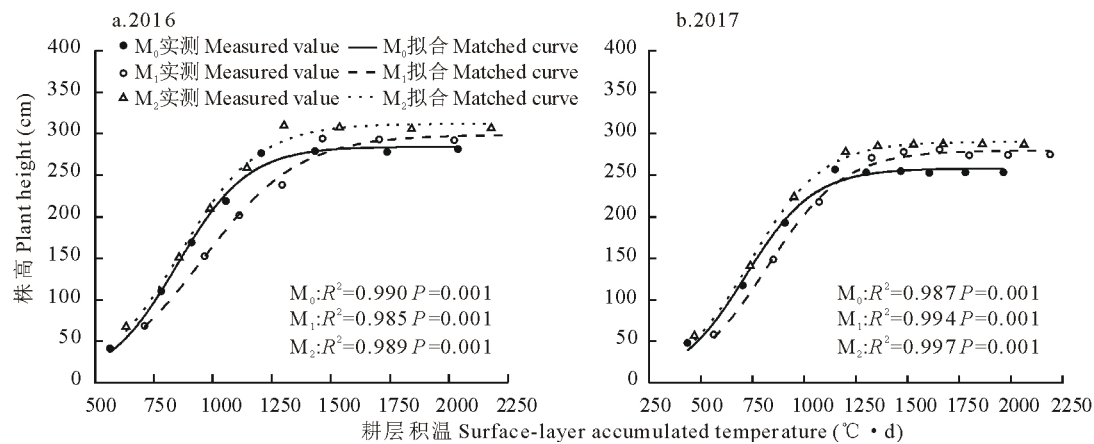


图 1 2016 和 2017 年不同颜色地膜覆盖下玉米株高实测值和拟合比较
omparison of measured values and the fitting of maize plant height under different film mulching in 2016 and 2017

表 2 株高随耕层积温变化的生长动态方程及相关点

Table 2 Dynamic equation of growth and related points for plant height with changes of surface-layer accumulated temperature							
年际	处理	Slogistic 方程	最大速率对应的积温	进入快增期积温	进入缓增期积温	最大生长速率	快增期平均生长速率
Year	Treatment	Slogistic equation	The accumulated temperature of the maximum growth rate ($T_g, ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	The accumulated temperature when entering the rapid growth period ($T_s, ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	The accumulated temperature when entering the slowly increasing stage ($T_h, ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	Maximum growth rate ($V_{\max}, \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	Average growth rate of the rapid growth period ($V, \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
2016	M ₀	$YH_1 = \frac{284.40}{1+294.27e^{-0.0067T_1}}$	849.7c	652.8b	1046.6c	0.4657b	0.4070b
	M ₁	$YH_2 = \frac{298.70}{1+114.38e^{-0.0049T_2}}$	959.4a	692.8a	1226.0a	0.3689c	0.3234c
	M ₂	$YH_3 = \frac{311.93}{1+186.73e^{-0.0061T_3}}$	862.9b	645.7b	1080.3b	0.4726a	0.4143a
2017	M ₀	$YH_4 = \frac{258.12}{1+80.35e^{-0.0061T_4}}$	717.9c	502.4b	933.5c	0.3943b	0.3457c
	M ₁	$YH_5 = \frac{279.77}{1+87.72e^{-0.0054T_5}}$	832.9a	581.4a	1066.5a	0.3798c	0.3330b
	M ₂	$YH_6 = \frac{290.41}{1+68.69e^{-0.0057T_6}}$	738.2b	508.3b	967.9b	0.4160a	0.3648a

注: T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 分别表示 2016 年 M_0 、 M_1 、 M_2 和 2017 年 M_0 、 M_1 、 M_2 处理耕层积温; YH_1 、 YH_2 、 YH_3 、 YH_4 、 YH_5 、 YH_6 分别表示 2016 年 M_0 、 M_1 、 M_2 和 2017 年 M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米株高。同列不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平上的差异显著。下同。

Note: T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 indicate the surface-layer accumulated temperature of M_0 、 M_1 、 M_2 in 2016 and 2017, respectively; YH_1 、 YH_2 、 YH_3 、 YH_4 、 YH_5 、 YH_6 indicate the plant height of M_0 、 M_1 、 M_2 in 2016 and 2017, respectively. Different small letters in the same column indicate significant differences at the $P<0.05$ level. The same below.

速率表现为 $M_2>M_1>M_0$,说明渐增期覆膜改善了土壤的水热条件,比露地能更有效地提高玉米的生长速率,黑膜对生长速率的影响大于无色透明膜; M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米株高快增期耕层积温区间分别为 $652.8\sim1046.6\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 、 $692.8\sim1226.0\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 、 $645.7\sim1080.3\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,不同的耕层积温区间均处于各自处理生长最迅速的拔节期,耕层积温每增加 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,植株分别平均增高 4.07 、 3.23 、 4.14 cm ,平均生长速率表现为 $M_2>M_0>M_1$,说明从株高快增期,也就是玉米拔节期开始,覆膜的作用在逐渐减弱,其中表现出黑膜优于无色透明膜; M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米株高缓增期耕层积温区间分为 $1046.6\sim2037.9\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 、 $1226.0\sim2557.2\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 、 $1080.0\sim2254.3\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,耕层积温每增加 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{d}$,植株平均分别增高 0.61 、 0.48 、 0.56 cm ,平均生长速率表现为 $M_0>M_2>M_1$,从玉米生长快增期至缓增期,露地玉米株高平均生长速率超过黑膜处理, M_0 处理玉米株高的生长速率分别比 M_1 和

M_2 处理增加了 27.08% 和 8.93%，更加进一步说明了黑膜和无色透明地膜均加速了玉米衰老，缩短了生育期，尤其是无色透明膜表现突出。 M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米株高达到最大生长速率时的耕层积温分别为 849.7、959.4、862.9 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，对应日期分别为 6 月 24 日、6 月 19 日、6 月 21 日，均发生在玉米的拔节期，从最大生长速率出现的日期上也可以说明无色透明地膜对玉米的衰老影响最大，无色透明地膜处理比露地和黑色地膜处理分别提前了 5 和 2 d。最大生长速率分别为 0.4657、0.3689、0.4726 $\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.2 不同处理叶面积指数随耕层积温变化动态

在玉米出苗至灌浆过程中，叶面积指数呈现出“缓慢增长—快速增长—缓慢增长”的趋势，满足 Slogistic 曲线的变化规律^[17]。本研究选取的研究时段为 2016 和 2017 年玉米出苗至灌浆期，探索叶面积指数随耕层积温增加而变化的动态规律。经比较分析，2017 年玉米叶面积指数随耕层积温变化动态规律和 2016 年一致（图 2），以下通过 2016 年玉米叶面积指数随耕层积温生长动态情况为例进行说明。

由表 3 可知， M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米叶面积指数渐增期的耕层积温区间分别为 0~758.2 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 、0~756.3 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 、0~703.4 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，在叶面积指数渐增期，耕层积温每增加 10 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，叶面积指数分别增加 0.019、0.020、0.021，平均增加速率表现为 $M_2 > M_1 > M_0$ ，各处理间差异不显著； M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米叶面积指数快增期的耕层积温区间分别为 758.2~1083.7 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 、756.3~1075.9 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 、703.4~957.1 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，对应的日期分别为 6 月 18 日—7 月 11 日、6 月 9 日—6 月 27 日、6 月 10 日—6 月 29 日，不同颜色地膜覆盖处理叶面积指数快增期持续的时间不同，具体表现为 $M_0 > M_2 > M_1$ ，说明覆膜缩短了快增期的持续时间，无色透明地膜和黑膜处理快增期持续时间分别比露地少了 5 和 4 d。在叶面积指数快增期，耕层积温每增加 10 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，叶面积指数分别增加 0.121、0.124、0.167，平均生长速率表现与渐增期一致，其中黑膜和无色透明地膜处理的平均生长速率比露地分别提高了 34.68%、2.48%，说明在玉米抽穗期前，覆膜处理的叶面积指数增加速率比露地快，尤其以黑膜处理较为突出，从而增大了叶面积指数，促进光合作用，增加干物质累积，为提高玉米产量奠定基础； M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米叶面积指数缓增期的耕层积温区间分别为 1083.7~1737.8 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 、1075.9~2021.9 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ 、957.1~1842.6 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，在此期间，耕层积温每增加 10 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，叶面积指数分别增加 0.022、0.015、0.018，平均增加速率表现为 $M_0 > M_2 > M_1$ ，说明无色透明膜加快了玉米生长速率，缩短了玉米生育期。 M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米叶面积指数达到最大生长速率时的耕层积温分别为 920.9、916.1、830.2 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ，对应日期分别为 6 月 30 日、6 月 17 日、6 月 18 日，可以看出，无色透明地膜处理叶面积指数最先达到最大生长速率，黑膜处理次之，露地处理最慢，最大生长速率分别为 0.0138、0.0142、0.0190 $\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，表现为 $M_2 > M_1 > M_0$ 。另外，由 Slogistic 方程可以发现，当耕层积温 T 趋近于无穷大时， Y 趋近于 a ，因此参数 a 可以代表作物生物量的最大累积量，由表 3 可知，2016 和 2017 年最大叶面积指数均表现为 $M_2 > M_1 > M_0$ ， M_2 处理的叶面积指数最大，两年的试验测产结果也均为 M_2 处理的产量最高。2016 年不同处理条件下最大玉米叶面积指数均比 2017 年高，表现为 M_0 、 M_1 、 M_2 处理叶面积指数分别比 2017 年提高了 19.20%、11.69%、5.92%。

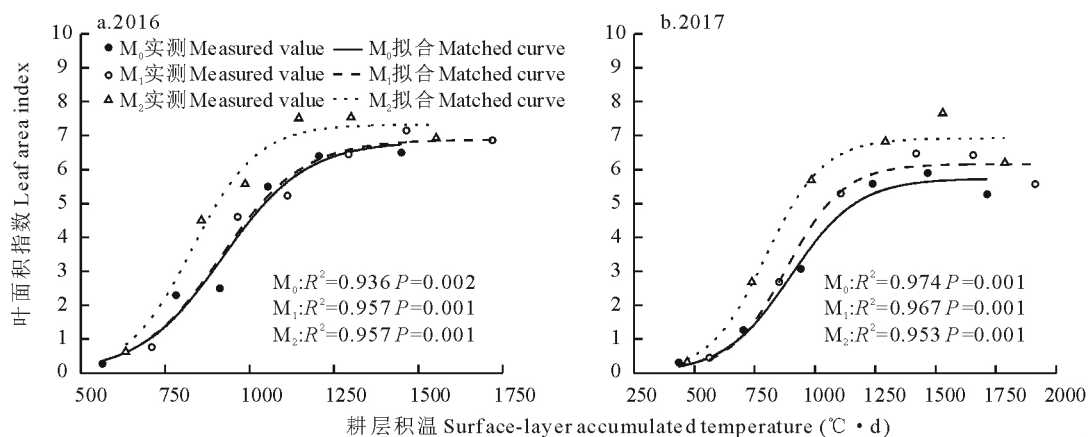


图 2 2016 和 2017 年不同覆盖处理玉米叶面积指数实测值和拟合值

mparison of measured values and the fitting of maize leaf area index under different film mulching in 2016 and 2017

表 3 叶面积指数随耕层积温增加的生长动态方程及相关点

Table 3 Dynamic growth equation and related points for leaf area index with changes of surface-layer accumulated temperature							
年际	处理	Slogistic 方程	最大速率对应的积温	进入快增期积温	进入缓增期积温	最大生长速率	快增期平均生长速率
Year	Treatment	Slogistic equation	The accumulated temperature of the maximum growth rate ($T_g, ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	The accumulated temperature when entering the rapid growth period ($T_s, ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	The accumulated temperature when entering the slowly increasing stage ($T_h, ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	Maximum growth rate ($V_{\max}$, $\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	Average growth rate of the rapid growth period (V , $\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
2016	M_0	$YL_1 = \frac{6.83}{1+1720.82e^{-0.0081T_1}}$	920.9a	758.2a	1083.7a	0.0138c	0.0121b
	M_1	$YL_2 = \frac{6.88}{1+1898.52e^{-0.0082T_2}}$	916.1a	756.3a	1075.9a	0.0142b	0.0124b
	M_2	$YL_3 = \frac{7.33}{1+5529.64e^{-0.01045T_3}}$	830.2b	703.4b	957.1b	0.0190a	0.0167a
2017	M_0	$YL_4 = \frac{5.73}{1+669.76e^{-0.0072T_4}}$	899.9a	717.8a	1082.1a	0.0104c	0.0091c
	M_1	$YL_5 = \frac{6.16}{1+1599.48e^{-0.0084T_5}}$	882.5a	724.9a	1039.9a	0.0129b	0.0113b
	M_2	$YL_6 = \frac{6.92}{1+846.05e^{-0.0085T_6}}$	797.7b	641.8b	953.0b	0.0146a	0.0128a

注: T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 分别表示 2016 年 M_0 、 M_1 、 M_2 和 2017 年 M_0 、 M_1 、 M_2 处理耕层积温; YL_1 、 YL_2 、 YL_3 、 YL_4 、 YL_5 、 YL_6 分别表示 2016 年 M_0 、 M_1 、 M_2 和 2017 年 M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米叶面积指数。
Note: T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 indicate the surface-layer accumulated temperature of M_0 、 M_1 、 M_2 in 2016 and 2017, respectively; YL_1 、 YL_2 、 YL_3 、 YL_4 、 YL_5 、 YL_6 indicate the leaf area index of M_0 、 M_1 、 M_2 in 2016 and 2017, respectively.

2.3 不同处理干物质随耕层积温变化动态

土壤温度对于干物质累积有重要的作用,随着耕层积温的增加,干物质累积过程逐渐减弱,趋于停止,结束生命。根据 2016 和 2017 年干物质累积实测数据,对不同处理下玉米的干物质累积进行 Slogistic 拟合,各处理拟合 R^2 均大于 0.9,拟合度均较好(图 3)。经比较分析,2017 年玉米干物质累积随耕层积温变化动态规律和 2016 年一致,以下通过 2016 年玉米干物质累积随耕层积温生长动态情况为例进行说明。

由表 4 可知, M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米干物质累积渐增期的耕层积温区间分别为 $0 \sim 631.8\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $0 \sim 582.1\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $0 \sim 683.3\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,在干物质累积渐增期,耕层积温每增加 $10\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,干物质累积分别平均增加 77.69 、 91.23 、 $86.26\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米干物质累积快增期的耕层积温区间分别为 $631.8 \sim 1444.7\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $582.1 \sim 1587.5\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $683.3 \sim 1522.1\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,对应的日期分别为 6 月 16 日—8 月 4 日、6 月 4 日—7 月 29 日、6 月 2 日—8 月 2 日,均处于各自处理玉米的拔节期至灌浆期。黑膜处理显著的增加了干物质累积快增期持续的时间,有利于产量的形成,分别比露地和无色透明地膜处理延长了 12 和 6 d,并且黑膜处理更早进入干物质累积快增期,从而为产量提高提供更多物质基础,无色透明地膜次之。在干物质累积快增期,耕层积温每增加 $10\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,干物质平均分别增加 164.76 、 165.92 、 $191.85\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米干物质累积缓增期的耕层积温区间分别为 $1444.7 \sim 2037.9\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $1587.5 \sim 2557.2\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ 、 $1522.1 \sim 2254.3\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,在此期间,耕层积温每增加 $10\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,干物质平均分别增加 67.77 、 49.87 、 $60.54\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。 M_0 、 M_1 、 M_2 处理玉米干物质累积达到最大生长速率时的耕层积温分别为 1038.2 、 1084.8 、 $1102.7\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$,对应的日期分别为 7 月 8 日、6 月 27 日、7 月 5 日,处于各自处理的灌浆期,由此可见,在玉米灌浆期加强田间管理,有助于产量的提高,干物质最大生长速率分别为 18.7916 、 14.5480 、 $21.8806\text{ kg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,表现为 $M_2 > M_0 > M_1$ 。从最大干物质累积量来看,2016 和 2017 年均表现为 $M_2 > M_1 > M_0$,说明黑膜覆盖处理能够提高干物质累积量,从而提高了玉米最终产量,这与张琳琳等^[18]研究结果一致。由图 4 可知,各个处理每个月的干物质累积量均随着月份的增加呈现出先增加后减少的趋势,其中 2016 和 2017 年 7 月干物质累积量最大,该时间段为玉米抽穗和灌浆期,为生殖生长阶段,由于籽粒的形成导致干物质累积的增加。覆膜处理对 5 和 6 月,即苗期和拔节期的干物质累积影响较大,随着时间的推移,覆膜的作用在逐渐减小,甚至无色透明地膜处理在 7 月的干物质累积量小于露地处理。

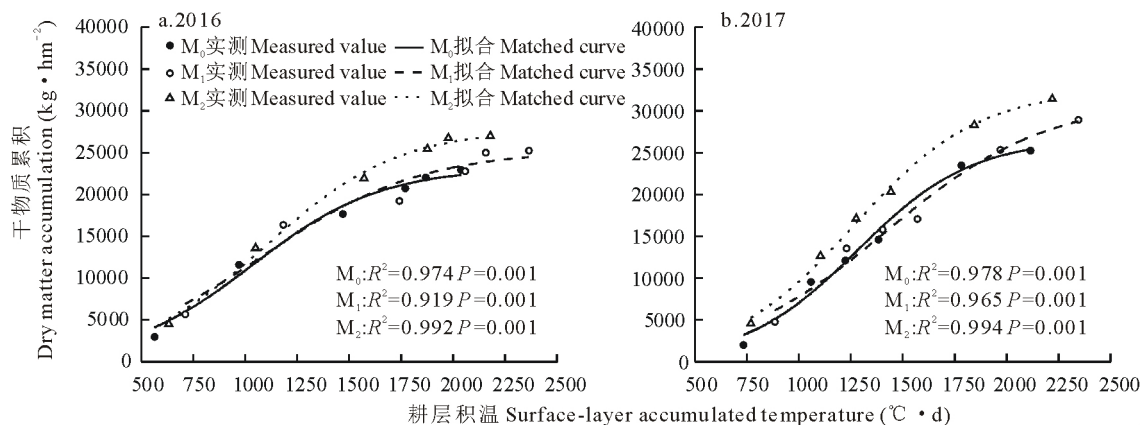


图3 2016和2017年不同覆盖方式条件下玉米干物质累积实测值和拟合值
comparison of measured values and the fitting of dry matter accumulation under different film mulching in 2016 and 2017

表4 干物质随耕层积温增加的生长动态方程及相关点

Table 4 Dynamic growth equation and related points for dry matter accumulation with changes of surface-layer accumulated

年际 Year	处理 Treatment	Slogistic 方程 Slogistic equation	最大速率对应的积温 The accumulated temperature of the maximum growth rate ($T_g, ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	进入快增期积温 The accumulated temperature when entering the rapid growth period ($T_s, ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	进入缓增期积温 The accumulated temperature when entering the slowly increasing stage ($T_h, ^\circ\text{C} \cdot \text{d}$)	最大生长速率 Maximum growth rate ($V_{\max}, \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	快增期平均生长速率 Average growth rate of the rapid growth period ($V, \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
2016	M_0	$YD_1 = \frac{23199.53}{1+28.90e^{-0.0032T_1}}$	1038.2c	631.8b	1444.7c	18.7916b	16.4764b
	M_1	$YD_2 = \frac{25331.73}{1+17.15e^{-0.0026T_2}}$	1084.8b	582.1c	1587.5a	14.5480c	16.5923b
	M_2	$YD_3 = \frac{27873.42}{1+31.89e^{-0.0031T_3}}$	1102.7a	683.3a	1522.1b	21.8806a	19.1848a
2017	M_0	$YD_4 = \frac{26631.67}{1+105.31e^{-0.0036T_4}}$	1282.9b	920.1a	1645.7b	24.1682b	21.1907b
	M_1	$YD_5 = \frac{31316.53}{1+41.45e^{-0.0026T_5}}$	1421.6a	918.9a	1924.2a	20.5123c	17.9851c
	M_2	$YD_6 = \frac{32530.70}{1+67.19e^{-0.0033T_6}}$	1263.5c	868.0b	1658.9b	27.0818a	23.7452a

注: $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ 分别表示 2016 年 M_0, M_1, M_2 , 2017 年 M_0, M_1, M_2 处理耕层积温; $YD_1, YD_2, YD_3, YD_4, YD_5, YD_6$ 分别表示 2016 年 M_0, M_1, M_2 和 2017 年 M_0, M_1, M_2 处理玉米干物质。

Note: $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ indicate the surface-layer accumulated temperature of M_0, M_1, M_2 in 2016 and 2017, respectively; $YD_1, YD_2, YD_3, YD_4, YD_5, YD_6$ indicate the dry matter accumulation of M_0, M_1, M_2 in 2016 and 2017, respectively.

2.4 干物质累积过程对产量形成的影响

玉米干物质的累积是产量形成的基础,不同颜色地膜覆盖和生态因子都会对玉米干物质的累积过程产生影响。在 Slogistic 方程中,达到生物量最大累积速率时对应的耕层积温与参数 b, k 有关,另外,玉米生长旺盛期的出现和结束时间则也与参数 b, k 有关,生物量最大累积速率则与参数 a, k 有关。由此可见, Slogistic 特征量的组合不仅代表作物不同的生物量累积过程,而且还具有不同的生物学意义,因此要研究不同的干物质累积过程如何最终影响到玉米的产量,就要研究干物质累积随耕层积温变化的 Slogistic 模型特征量与产量之间的关系。将干物质累积 Slogistic 模型的特征量与玉米产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)之间做逐步回归分析,得到模型如下:

$$Y=4530.43-16.92T_s+8.58T_h+77.96ak \quad (R=0.85, P=0.01) \quad (11)$$

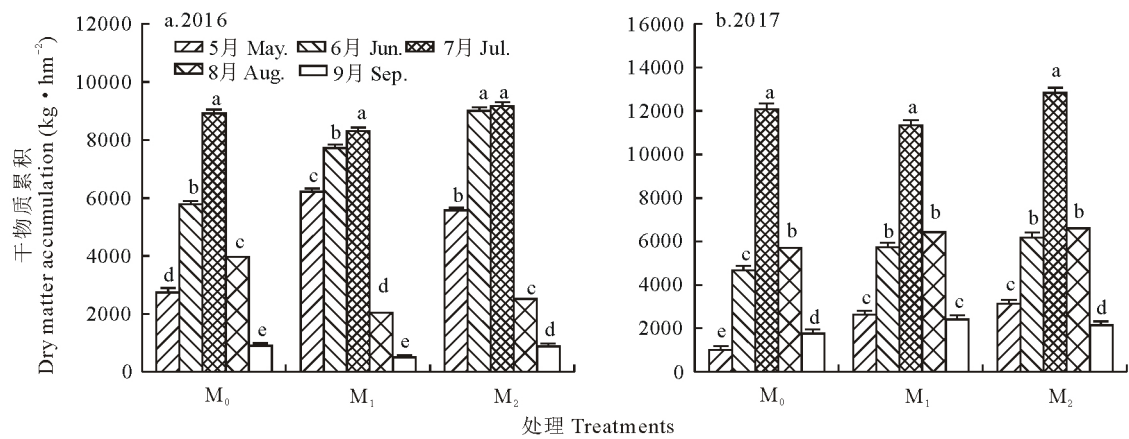


图 4 5—9 月干物质累积量

Fig. 4 Dry matter accumulation from May to September in 2016 and 2017

不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。The different letters mean significant differences at $P<0.05$, the same below.

从式(11)可以看出,玉米产量和 Slogistic 模型特征量之间存在一定的相关性,玉米产量的形成与曲线的特征 $ak/4$ 、 T_s 和 T_h 的关系较大。不同处理的干物质累积过程反映到 Slogistic 耕层积温模型上就是参数的变化,反映在数学关系上即是不同的模型参数组合的表达式,不同的参数组合就会形成不同形状的图形,而不同形状的图形反映的就是不同的干物质累积过程。因为 $T_s=(\ln b-1.32)/k$, $T_h=(\ln b+1.32)/k$, 所以将式(11)进行变形处理如下:

$$Y=4530.43+77.96ak+8.58(T_h-T_s)-8.34T_s \tag{12}$$

$$Y=4530.43+77.96ak+8.58(2.64/k)-8.34(\ln b+1.317)/k \tag{13}$$

从干物质累积过程来看,式(12)表明产量的形成与最大干物质累积速率呈正相关,累积速率越大,产量越高,因此在干物质累积最大速率出现的时期加强田间管理,可以提高产量; T_h-T_s 代表干物质累积快增期的持续时间, T_h-T_s 越大,干物质累积就越多,玉米产量就越高; T_s 代表进入干物质累积快增期的时间,进入快增期时间越早,玉米产量就越高。由表 5 可知, T_s 、 T_h 和 ak 的偏相关系数分别为 -0.81 、 0.80 和 0.66 ,表明对产量的影响大小依次为 $T_s>T_h>ak$ 。2016 和 2017 年不同颜色覆盖处理下干物质累积最大生长速率表现为 $M_2>M_0>M_1$,干物质累积快增期持续时间表现为 $M_2>M_1>M_0$,并且黑色地膜处理比露地和无色透明地膜处理分别提前 14 和 2 d 进入干物质累积快增期。由图 5 可知,2016 和 2017 年 M_2 处理产量最高,因此该地区黑膜覆盖较适宜玉米生长。而(13)式可以进一步形成产量与 Slogistic 模型参数 a 、 b 和 k 的关系。

此外,各参数通过其他参数来间接影响产量,其中最大生长速率($ak/4$)和结束干物质累积快增期时间(T_h)均主要通过影响进入干物质累积快增期的时间(T_s)来间接影响玉米产量,进入干物质累积快增期的时间(T_s)主要是通过影响最大生长速率($ak/4$)来间接影响玉米产量。

3 讨论

Liu 等^[2]研究表明,无色透明膜处理的土壤温度显著高于黑膜处理;Dang 等^[19]也研究发现,在玉米生长早期时,覆膜处理的土壤温度显著高于露地处理。研究发现,不同颜色地膜覆盖下,覆膜效应不同,2016 和 2017 年无

表 5 玉米产量与表征干物质动态过程的特征量的回归关系
Table 5 The relationship between the maize yield and the characteristic of the dynamic process of dry matter

特征量 Characteristic quantity	偏相关系数 Partial correlation coefficient	相关系数 Correlation coefficient		
		T_s	T_h	ak
T_s	-0.81	1.00		
T_h	0.80	0.61	1.00	
ak	0.66	0.79	0.04	1.00

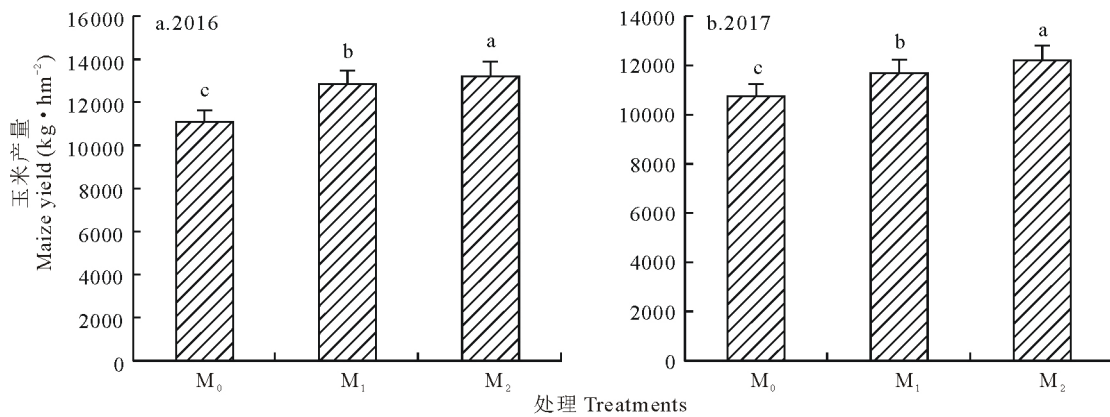


图5 2016和2017年不同颜色地膜覆盖下玉米产量

Fig. 5 Maize yield with different color mulch treatments in 2016 and 2017

色透明膜处理下耕层积温比露地和黑膜处理分别提高了 25.48%、13.43%和 11.07%、7.94%。覆膜效应的产生主要是因为其改善了土壤的水热条件,一方面,无色透明膜可以截获更多的太阳辐射,减少太阳辐射的反射,从而影响土壤温度^[20],另一方面,长波会被薄膜上凝结的露珠阻断,引起地面温度上升,同时水分蒸发带走的部分潜热会被保留,乱流或者平流也会传递给地表部分热能;但是无色透明膜使耕层积温升高的同时,也缩短了玉米的生育期,这是因为不同处理玉米完成某一生育阶段的有效积温值是相同的,而地积温会弥补气积温的不足,生育期的缩短一定程度上影响了玉米灌浆进程和产量的提高。

乔嘉等^[16]通过 Logistic 模型研究了不同栽培管理措施条件下玉米的干物质累积过程对产量的影响,发现干物质累积与产量有关,且单株玉米籽粒产量与 Logistic 方程参数之间存在一定的关系。本研究进一步揭示了干物质累积 Slogistic 方程特征量与玉米群体产量的具体关系,产量的形成与最大干物质累积速率呈正相关;干物质累积快增期持续的时间越长,产量越高;进入快增期的时间越早,产量越高。通过两年试验,发现不同颜色地膜处理和年际间的差异对玉米达到最大干物质累积速率的时间影响不大,主要时段分布在 6 月末至 7 月初。因此,在该时间段内加强田间管理,有助于提高作物产量。通过对干物质累积速率和快增期持续时间以及进入快增期时间点的理论分析发现,2016 和 2017 年不同颜色覆盖处理下干物质累积均以黑膜处理最大,干物质累积快增期持续均以黑膜处理最长,进入干物质累积快增期的时间均以黑膜处理最早,因此从理论上分析黑膜处理产量最高。而由图 5 实际测产可知,亦是黑膜处理最高,说明该模型能够准确描述产量与方程特征量之间的关系,2016 和 2017 年黑膜处理产量分别比露地和无色透明地膜处理提高 19.08%、2.74%和 13.48%、4.48%,黑膜覆盖在研究区较无色透明膜处理更有利于玉米生长。

付雪丽等^[21]利用“归一化”方法分别建立了不同作物的叶面积指数和粒重与生育天数的动态共性模型,实现了以模型分析禾谷类作物叶面积指数和粒重动态的普适性,利于作物间叶面积指数和粒重的直观横向比较。本研究对成熟期前的玉米叶面积指数进行了 Slogistic 模拟,结果发现模拟曲线能很好地描述玉米出苗至灌浆期间叶面积指数动态变化过程;孔德胤等^[22]利用了 Logistic 方程,确定了河套地区覆膜和露地玉米根系、地上部分器官随地积温增加而增长的渐增期、快增期和缓增期等信息,并发现覆膜玉米地上干重进入缓增期的时间比露地提前了 24 d。本研究则以不同颜色地膜覆盖为试验处理,以有效耕层积温为自变量,通过 Slogistic 方程来研究玉米生长随耕层积温增加的动态规律,研究发现,不同颜色地膜对玉米渐增期、快增期和缓增期株高的增长速率影响不同;无色透明地膜处理缩短了叶面积指数快增期的持续时间,在抽穗期前,黑膜处理的叶面积指数平均增长速率最大,无色透膜次之,叶面积指数的增大可以更好地进行光合作用,这可为提高玉米产量打下基础。

4 结论

(1)玉米株高的快增期和最大生长速率均发生在拔节期,其中 2016 年无色透明膜处理株高达到最大生长速率的时间比露地和黑膜处理分别提前了 5 和 2 d。在玉米渐增期,不同处理平均生长速率表现为 $M_2 > M_1 > M_0$,

在快增期表现为 $M_2 > M_0 > M_1$, 缓增期表现为 $M_0 > M_2 > M_1$, 说明在玉米苗期, 黑膜对玉米株高的影响最大, 无色透明膜次之, 而在玉米苗期之后, 覆膜对株高的影响不断减弱, 但仍表现为黑膜处理优于无色透明膜。

(2) 不同颜色地膜覆盖下玉米叶面积指数的快增期均发生在拔节期, 露地处理较其他处理增加了叶面积指数快增期持续时间, 而无色透明膜缩短了玉米生育期。在渐增期和快增期, 叶面积指数平均增加速率表现为 $M_2 > M_1 > M_0$, 2016 和 2017 年最大叶面积指数也表现为 $M_2 > M_1 > M_0$, 说明黑膜处理增大了叶面积指数, 叶面积指数的增加影响了玉米叶片光合作用, 从而有利于提高玉米产量。

(3) 2016 和 2017 年玉米最大干物质累积量均表现为 $M_2 > M_1 > M_0$, 黑膜覆盖延长了玉米干物质累积的快增期持续时间, 且较其他处理提前进入快增期, 无色透明膜次之。不同处理干物质累积量均随着月份的增加呈现出先增加后减少的趋势。干物质最大增长速率表现为 $M_2 > M_0 > M_1$, 并且干物质到达最大增长速率的日期在 6 月 27 日—7 月 8 日, 因此在该时期内加强田间管理, 对于作物产量的提高非常关键。

(4) 对干物质累积过程的 Slogistic 方程特征量与产量进行了逐步回归分析, 玉米产量和 Slogistic 模型特征量的组合之间存在密切关系, 最大干物质累积速率和干物质累积快增期持续的时间与玉米产量正相关, 进入快增期时间与玉米产量负相关。

参考文献 References:

- [1] Ma S Q, Wang Q, Chen F T, *et al.* Impact of spring maize seeding growth on yield and assessment models of production cut under background of spring drought. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(Supple 1): 171—179.
马树庆, 王琪, 陈凤涛, 等. 春旱背景下春玉米苗情对产量的影响及减产评估模式. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 171—179.
- [2] Liu Q, Chen Y, Li W, *et al.* Plastic-film mulching and urea types affect soil CO₂ emissions and grain yield in spring maize on the Loess Plateau. Scientific Reports, 2016, 6: 28150.
- [3] Li S Z, Fan T L, Zhao G, *et al.* Effects of different cultivation patterns on soil moisture, temperature, yield and quality of dryland maize. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(4): 34—44.
李尚中, 樊廷录, 赵刚, 等. 旱地玉米不同覆盖栽培模式的土壤水热特征及产量品质效应. 草业学报, 2018, 27(4): 34—44.
- [4] Gao Y H, Niu J Y, Xu R, *et al.* Effects of different film mulching on photosynthesis, transpiration rate and leaf water use efficiency of maize. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(5): 178—184.
高玉红, 牛俊义, 徐锐, 等. 不同覆膜方式对玉米叶片光合、蒸腾及水分利用效率的影响. 草业学报, 2012, 21(5): 178—184.
- [5] Li S Z, Fan T L, Zhao G, *et al.* Effects of hybrid, plant density and plastic film mulching on yield and water use efficiency of dryland maize. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(12): 35—47.
李尚中, 樊廷录, 赵刚, 等. 品种、密度与覆膜方式对旱地春玉米产量和水分利用效率的影响. 草业学报, 2017, 26(12): 35—47.
- [6] Qi Y H, Yue D C, Cao S F, *et al.* Soil moisture, soil temperature, weed control and yield effects of double ridge plastic film mulching in maize production. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(11): 176—184.
漆永红, 岳德成, 曹素芳, 等. 全膜双垄沟播玉米土壤含水率和温度及杂草去除效应. 草业学报, 2017, 26(11): 176—184.
- [7] Wang L, Xie D T, Liu H L, *et al.* A universal growth model for maize leaf area index. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2004, 26(3): 303—306.
王玲, 谢德体, 刘海隆, 等. 玉米叶面积指数的普适增长模型. 西南农业大学学报(自然科学版), 2004, 26(3): 303—306.
- [8] Zhang X D, Cai H J, Fu Y J, *et al.* Study on the variation of leaf area index of summer maize in loess region. Agricultural Research in the Arid Area, 2006, 24(2): 25—29.
张旭东, 蔡焕杰, 付玉娟, 等. 黄土区夏玉米叶面积指数变化规律的研究. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 25—29.
- [9] Zhang Y S, Yu Z R, Driessen P M. Experimental study of assimilate production, partitioning and translocation among plant organs in summer maize (*Zea mays*) under various environmental and management conditions. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(1): 104—109.
张银锁, 宇振荣, Driessen P M. 环境条件和栽培管理对夏玉米干物质积累、分配及转移的试验研究. 作物学报, 2002, 28(1): 104—109.
- [10] Zhao J, Zheng Z F, Fang Y R, *et al.* Effect of dry matter accumulation characteristics on yield of winter wheat analyzed by

dynamic simulation model. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 300–308.

赵姣, 郑志芳, 方艳茹, 等. 基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响. *作物学报*, 2013, 39(2): 300–308.

- [11] Sepaskhah A R, Fahandezh-Saadi S, Zand-Parsa S. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management. *Agricultural Water Management*, 2011, 99(1): 51–57.

- [12] Lü X. Studies on effects of ecological factors on growth of maize and establishment of climate ecology model and appraisalment system. Taian: Shandong Agricultural University, 2002.

吕新. 生态因素对玉米生长发育影响及气候生态模型与评价系统建立的研究. 泰安: 山东农业大学, 2002.

- [13] Wang J, Cai H J, Chen F, *et al.* Experimental study on evapotranspiration and soil evaporation in summer maize field. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (11): 108–113.

王健, 蔡焕杰, 陈凤, 等. 夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究. *水利学报*, 2004, (11): 108–113.

- [14] Wang R D, Yin J Z. Crop cultivation science. Beijing: Higher Education Press, 2015.

王荣栋, 尹经章. 作物栽培学. 北京: 高等教育出版社出版, 2015.

- [15] Yang N, Sun Z X, Zhang L Z, *et al.* Simulation of water use process by film mulched cultivated maize based on improved AquaCrop model and its verification. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(Supple 1): 122–132.

杨宁, 孙占祥, 张立桢, 等. 基于改进 AquaCrop 模型的覆膜栽培玉米水分利用过程模拟与验证. *农业工程学报*, 2015, 31(增刊 1): 122–132.

- [16] Qiao J, Zhu J C, Zhao J. Study on the effect of dry matter accumulation process on maize yield based on Logistic model. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(5): 32–38.

乔嘉, 朱金城, 赵姣. 基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究. *中国农业大学学报*, 2011, 16(5): 32–38.

- [17] Lin Z H, Xiang Y Q, Mo X G, *et al.* Normalized leaf area index model for summer maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(4): 69–72.

林忠辉, 项月琴, 莫兴国, 等. 夏玉米叶面积指数增长模型的研究. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 69–72.

- [18] Zhang L L, Sun S J, Chen Z J, *et al.* Effects of different colored plastic film mulching and planting density on dry matter accumulation and yield of spring maize. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 113–124.

张琳琳, 孙仕军, 陈志君, 等. 不同颜色地膜与种植密度对春玉米干物质积累和产量的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 113–124.

- [19] Dang J, Liang W, Wang G, *et al.* A preliminary study of the effects of plastic film-mulched raised beds on soil temperature and crop performance of early-sown short-season spring maize (*Zea mays* L.) in the north China plain. *The Crop Journal*, 2016, 4(4): 331–337.

- [20] Tarara J M. Microclimate modification with plastic mulch. *Hortscience*, 2000, 35(2): 169–180.

- [21] Fu X L, Zhao M, Zhou B Y, *et al.* Optimal model for dynamic characteristics of grain weight commonly used in wheat and maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(2): 309–316.

付雪丽, 赵明, 周宝元, 等. 小麦、玉米粒重动态共性特征及其最佳模型的筛选与应用. *作物学报*, 2009, 35(2): 309–316.

- [22] Kong D Y, Zhi H, Zhang F Q, *et al.* Dynamic growth models joint with changes of accumulated soil temperature for corn mulched and unmulched with plastic film in Hetao areas. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(1): 67–70.

孔德胤, 智海, 张富强, 等. 河套地区覆膜与裸地玉米随地积温变化的生长动态模型. *中国农业气象*, 2008, 29(1): 67–70.