

# 基于 Richards 模型的全膜双垄沟播与传统栽培模式玉米生长势差异研究

赵 凡

(甘肃省榆中县农业技术推广中心, 甘肃 榆中 730100)

**摘 要:** 应用 Richards 生长方程, 以春玉米为材料, 设了 3 种栽培处理, 从动态数学模型的角度, 研究大田条件下全膜双垄沟播模式与传统栽培模式玉米的生长势特征差异及对产量的影响。结果表明: 3 种处理株高、单株叶面积、单株可见叶数生长积累量均呈“慢—快—慢”的 S 型 Richards 模型曲线变化; 全膜双垄沟播玉米各指标的生长累积 Richards 曲线和生长速率及速率变化率曲线形态与半膜和露地对照相比有明显差异, 其生长起始势 ( $R_0$ ) 高, 生长势指标进入指数和稳定生长阶段早于对照 8 ~ 20 d; 最大生长速率及出现的时间都明显高于和早于露地对照, 全膜双垄沟播玉米的株高最大增长速率为  $6.755 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 是对照的 1.384 倍; 单株绿叶面积最大增长速率为  $330.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ , 是对照的 1.391 倍; 单株可见叶数最大增长速率为  $0.412 \text{ 片} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{株}^{-1}$ , 是对照的 1.383 倍; 全膜双垄沟播玉米增长速率变化幅度大, 呈现加速快但减速也快的特点; 稳定增长阶段明显增长, 为露地对照的 1.493 ~ 1.618 倍。全膜双垄沟播使作物在生长后期将更多的能量分配给了生殖生长, 使玉米叶片后期早衰速度减慢, 利于玉米抽雄授粉和灌浆, 表现较高的穗粒数、粒叶比和百粒重, 显著提高产量。

**关键词:** 玉米; 全膜双垄沟播; 生长势; Richards 模型

**中图分类号:** S513      **文献标志码:** A

## Research on growth variations of maize by whole film double furrow sowing based on Richards model from traditional cultivation mode

ZHAO Fan

(Agri-tech Extension Center of Yuzhong County, Yuzhong, Gansu 730100, China)

**Abstract:** To investigate the differences in growth characteristics and effects on yield of maize in the field between double furrow sowing with film and the traditional cultivation mode, based on Richards model, a study was carried out through dynamic mathematical method using spring maize under three cultivation treatments. The results showed that plant height, leaf area per plant, the number of visible leaf growth accumulation under three treatments showed a slow – fast – slow curve as Richards model pattern. Significant differences were observed on Richards curve of growth and accumulation for each index, growth rate, and speed variation curve between double furrow sowing with film and the semimembranosus and open plots, showing a high initial growth potential of  $R_0$ . Index of growth reaching to exponential and stable growth stage was 8 ~ 20 days earlier than that of the control. The maximum growth rate was obviously higher and the emergence time was earlier than those in the hcontrol. The maximum height growth rate of maize plant by double furrow sowing with whole film was  $6.755 \text{ cm} \cdot \text{day}^{-1}$ , 1.512 times as high as that in the control. The maxium growth rate in green leaf area was  $330.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{day}^{-1} \cdot \text{plant}^{-1}$ , 1.409 times as high as that in the control. Number of leaves per plant showed maximum growth rate of  $0.412 \text{ day} \cdot \text{plant}^{-1}$ , 1.383 times as high as that in the control. Double furrow sowing with whole film on maize growth rate changed greatly, showing a characteristic of fast acceleration and fast deceleration. A significant growth was observed during the stable growth period, 1.493 ~ 1.618 times as high as that in the control. The crops at late growth stage allocate energy for reproductive growth, resulting in slow senescence rate of maize leaf. This allows maize pollination and grain filling, showing high grain number per ear, grain leaf ratio and 100 grain weight, which increases maize yield.

**Keywords:** corn; whole field surface plastic mulching and double ridge-furrow planting; growth potential; richards model

近几年,全膜双垄沟播技术<sup>[1]</sup>因其具有良好的增温、聚水和保墒效果,在北方旱作区大面积推广应用的过程中取代了传统的露地和半膜覆盖模式,该技术模式较露地和半膜覆盖模式使玉米等作物增产 30% 以上<sup>[2-7]</sup>,这与玉米在全膜双垄沟播栽培模式下生长势的变化直接相关<sup>[3]</sup>,因此,研究全膜双垄沟播模式玉米生育期内的生长势动态变化特征对实现玉米的持续高产具有重要意义。玉米生长势的动态变化的研究以往针对传统的露地和半膜覆盖模式栽培玉米较多<sup>[8-10]</sup>。而在全膜双垄沟播模式玉米生长势动态数学模型利用方面的对比研究鲜见报道。本研究以春玉米为试验材料,以当前对生物生长过程描述最准确、适应性最强的 4 参数非线性 Richards 生长方程<sup>[10-11]</sup>为拟合模型函数,以对玉米形态及长势和产量有主要影响的株高、单株叶面积、单株可见叶数为生长势性状指标,以时间变量相对生长天数为自变量,建立动态模型,并通过推导出的特征参数对其动态特征进行定量分析。明确全膜双垄沟播模式玉米与传统栽培模式玉米在生育期间的生长势差异特征,揭示全膜双垄沟播种植技术的增产机制,为旱地全膜双垄沟播技术进一步实现高产高效提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2010 年在甘肃省榆中县农业技术推广中心试验地进行。该区海拔 1 874 m,年平均气温 6.7℃,年辐射总量 5 483.98 MJ·m<sup>-2</sup>,年日照时数 2 665.9 h,≥10℃积温 2 366.1℃,无霜期 120 d,属典型的中温带干旱、半干旱性大陆内地气候,作物一年一熟,无灌溉,为典型的旱地雨养农业。年均降雨量 412.5 mm,降水相对变率为 19%,4—9 月降水量占全年降水量的 87%,蒸发量 1 406 mm。试验地土壤为黑垆土,0~30 cm 土层平均容重 1.37 g·m<sup>-3</sup>,田间持水量 23%,永久凋萎系数为 6.5%。2010 年玉米全生育期降雨 332.3 mm,主要集中在 5、8、9 月份。

### 1.2 试验设计

试验以春玉米品种“临单 217”为材料。采用完全随机区组设计,设 3 个处理:A 处理,全膜双垄沟播,用 1.2 m 宽地膜覆盖;B 处理,半膜覆盖垄作;C 处理,露地垄作(CK)。每处理 3 次重复。玉米全部

采用宽窄行种植(70 cm/40 cm),小区面积 6 m×5 m = 30 m<sup>2</sup>),种植密度 6 万株·hm<sup>-2</sup>,试验执行期间不进行耕作,基肥在 2010 年春季整地时翻施,起垄覆膜前在种植行间施用种肥,施肥量为 N 225 kg·hm<sup>-2</sup>、P 130 kg·hm<sup>-2</sup>、K 120 kg·hm<sup>-2</sup>。全膜双垄沟播处理 2010 年播种前在整好的农田用起垄器起双垄,起垄覆膜模式及田间管理按“旱地玉米双垄面集雨全膜覆盖沟播栽培技术”<sup>[1]</sup>进行,行距即按大垄宽 70 cm,高 15 cm,小垄宽 40 cm,高 20 cm。沟宽小于 3 cm,处理 A 用 1.2 m 宽地膜覆盖,玉米播种在大小弓形垄中间的播种沟内,株距 30 cm。每个播种沟对应一大一小两个集水垄面。露地垄作起平顶垄,宽 70 cm,高 15 cm,垄间沟宽 40 cm,半膜覆盖垄作起垄模式与露地垄作完全一致,垄上覆盖 80 cm 地膜,膜与膜相接缝在垄沟内。地膜厚度均为 0.008 mm。露地垄作与半膜覆盖垄作玉米在垄上播种两行,行距 40 cm,株距 30 cm。4 月 30 日播种,10 月 15 日收获。

### 1.3 测定项目及分析方法

1.3.1 生长势指标测定 为提高生长模型的模拟精度,在玉米三叶期,各小区选取生长一致的 5 株挂牌标记,采用田间活体无损跟踪测量的方法测定株高、单株叶面积、单株可见叶数。从三叶期至成熟每隔 7 d 在田间测量一次,株高用直尺测量;叶面积用直尺测量每株各有效叶片的叶长( $L_i$ )和最大叶宽( $B_i$ );记录可见叶数。

$$\text{单株叶面积} = 0.75 \sum_{i=1}^m (L_i \times B_i) \quad (1)$$

式中, $m$  为单株可见叶数。

1.3.2 生长模型和参数意义 采用当前对生物生长过程描述最准确、适应性最强、具有可塑性的 4 参数非线性 Richards 生长方程<sup>[10-11]</sup>,以玉米株高、单株可见叶数、单株叶面积为因变量( $Y$ ),以播后相对生长天数为自变量( $t$ )建立玉米生长势指标随自变量变化的动态模型方程<sup>[10-11]</sup>。

$$Y = \frac{A}{(1 + be^{-kt})^m} \quad (2)$$

式中, $Y$  为生长势指标, $t$  为相对生长天数即自变量; $A$  为终极生长量,是累积生长的饱和值或称之为生物学上限; $b$  为初值参数, $k$  是生长速率参数, $m$  为形状参数。对 Richards 方程求一阶导数得生长速率方程  $Y'$ :

$$Y' = \frac{dY}{dt} = \frac{mAbke^{-kt}}{(1 + be^{-kt})^{1+m}} = Ykmb \frac{e^{-kt}}{1 + be^{-kt}}$$

$$= kYm\left[1 - \left(\frac{Y}{A}\right)^{1/m}\right] \tag{3}$$

生长起始势:

$$R_0 = km \tag{4}$$

对 Richards 方程求二阶导数得生长速率变化率  $Y''$ :

$$Y'' = \frac{d^2 Y}{dt^2} = \frac{mAbk^2 e^{-kt}}{(1 + be^{-kt})^{m+2}}(mbe^{-kt} - 1) \tag{5}$$

当  $Y'' = 0(mbe^{-kt} - 1) = 0$  时为生长速率的高峰期,也是生长累积曲线的拐点,生长速率由快变慢的转折点。其时间  $t_{poi}$  可由式(6) 表示:

$$t_{poi} = \ln(bm)/k \tag{6}$$

此时生长量  $Y_{poi}$  和最大生长速率  $Y''_{poi}$  分别为:

$$Y_{poi} = \frac{A}{(1 + b\exp(-kt_{poi}))^m} = A\left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-m} \tag{7}$$

$$Y''_{poi} = \frac{mAbk\exp(-kt_{poi})}{(1 + b\exp(-kt_{poi}))^{1+m}} = Ak\left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-1+m} \tag{8}$$

生长速率为最大时的生长量与生长终值量比值:

$$I = Y_{poi}/A \tag{9}$$

生长速率曲线有两个拐点:

$$t_{1,2} = -\ln\left(\frac{3m + 1 \pm \sqrt{5m^2 + 6m + 1}}{2m^2 b}\right)/k \tag{10}$$

以此确定生长过程的早期即初始生长阶段(0 ~  $t_1$ )、中期即指数生长阶段( $t_1$  ~  $t_2$ )、后期即稳定生长阶段( $t_2$  ~  $t_{99}$ ),即 3 个不同速率和速率变化率的阶段,其中  $t_1$  是初始生长阶段与指数生长阶段的分界点, $t_2$  是指数生长阶段与稳定生长阶段的分界点,时间  $t_{poi}$  为长势指标生长速率的高峰期,也是其生长累积曲线(图 1) 拐点对应  $x$  轴的位置点,是生长速率由快变慢的转折点,为生长动态速率曲线的极大值对应  $x$  轴的位置点(图 2)。也是生长动态速率变化率曲线(图 3) 与  $x$  轴的交点,即生长速率变化率

为 0 的点。

1.3.3 产量及其构成因素 对挂牌标记测定的 5 株植株成熟后进行室内考种。测定株高、穗位高、穗长、穗粒数、穗粒重、百粒重,粒叶比 = 最终总粒数/吐丝期群体叶面积<sup>[12]</sup>。每小区按实收计算产量。

1.3.4 数据处理 为了使不同模式 Richards 方程曲线之间便于比较研究,利用归一化方法<sup>[13]</sup>将 2010 年 3 个处理播后至试验记录结束的生长日数、株高、单株可见叶数、单株叶面积换算为相对值,取值范围均为 0 ~ 1。计算方法为:  $Y_i = X_i/X_{\max}$ ,其中  $X_{\max}$  为玉米播种后至试验记录结束时各个指标的最大值,  $X_i$  为测量记录值,然后用 DPS7.5 系统进行拟合<sup>[14]</sup>,建立具有生物学意义的生物生长变化模型。结合公式(3) ~ (10) 用 Excel2007 进行数据统计分析,求得相关参数并制图。

2 结果与分析

2.1 不同处理玉米植株生长势的 Richards 动态模型特征

用播后相对生长日数做为时间标尺变量建立不同处理玉米株高、单株叶面积、单株叶片数的 Richards 动态模型(表 1)(图 1),通过时间变量的变化,对生长过程准确描述。随生长时间的增加,不同处理株高、单株叶面积、单株可见叶数生长积累量呈“慢—快—慢”的 S 型 Richards 模型曲线变化(图 1),即前期初始阶段增长缓慢,中期指数阶段增长迅速,此后在稳定阶段又趋于缓慢直至达到最大值。处理 A 的各指标生长累积曲线均高于对照,拟合的 Richards 模型参数估计值及决定系数见表 1,其决定系数  $R^2 = 0.9965 \sim 0.9997$ ,说明用 Richards 方程拟合生长过程是适用的。

表 1 各处理玉米株高、单株叶面积、单株叶片数的 Richards 方程参数

| Table 1 The Richards equation parameter for corn plant height, leaf area and leaf number per plant by each treatment |                 |       |       |            |       |                       |           |        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------|-------|------------|-------|-----------------------|-----------|--------|
| 生长势指标<br>Index of growth                                                                                             | 处理<br>Treatment | A     | k     | b          | m     | 拟合度<br>R <sup>2</sup> | 相关系数<br>R | P      |
| 株高<br>Plant height                                                                                                   | A               | 0.920 | 16.18 | 21777.76   | 0.437 | 0.9985                | 0.9992    | 0.0001 |
|                                                                                                                      | B               | 0.882 | 16.43 | 68774.37   | 0.420 | 0.9986                | 0.9993    | 0.0001 |
|                                                                                                                      | C               | 0.786 | 19.27 | 1709700.90 | 0.303 | 0.9997                | 0.9998    | 0.0001 |
| 单株叶面积<br>Leaf area                                                                                                   | A               | 0.986 | 15.62 | 1256.26    | 1.144 | 0.9985                | 0.9993    | 0.0001 |
|                                                                                                                      | B               | 0.959 | 13.98 | 1497.04    | 1.170 | 0.9978                | 0.9989    | 0.0001 |
|                                                                                                                      | C               | 0.882 | 13.92 | 6895.45    | 0.825 | 0.9984                | 0.9992    | 0.0001 |
| 单株叶片数<br>Leaf number<br>per plant                                                                                    | A               | 0.945 | 12.41 | 252.95     | 0.469 | 0.9988                | 0.9994    | 0.0001 |
|                                                                                                                      | B               | 1.011 | 9.30  | 77.38      | 0.635 | 0.9978                | 0.9989    | 0.0001 |
|                                                                                                                      | C               | 0.939 | 9.32  | 264.35     | 0.440 | 0.9978                | 0.9989    | 0.0001 |

不同栽培模式玉米有自身的生长发育特征,不同处理对玉米株高、单株绿叶面积、单株可见叶数、关键生育时期有明显的影响(表 1~3,图 1)。3 个处理的玉米株高、单株绿叶面积的终极生长量 A 值大小为:A 处理>B 处理>C 处理。但不同处理对单株可见叶数终极生长量影响不大,A 值十分接近(表 1),累积生长曲线末端基本粘合(图 1),说明玉米总叶数变化不大,是一个比较稳定的品种特性。

### 2.2 玉米各生长势指标的生长起始势变化趋势

不同处理玉米株高、单株叶面积、单株叶片数的生长起始势( $R_0$ )反映了植株长势指标性状的增长潜势, $R_0$  值大,相应长势指标性状增长速度快,进入快速生长阶段早。其达到最大生长量的时间早于起始势  $R_0$  小的处理。 $R_0$  值小则进入快速生长阶段迟,后期生长时间短,生育期内生殖生长阶段所占比例下降,不利于籽粒高产。3 种处理的株高、单株叶面积、单株可见叶  $R_0$  值呈 A 处理高于 B、C 处理,C 处理最小(表 3),说明 A 处理进入快速生长阶段早,生育期内生殖生长阶段占比例大,吐丝抽雄早,授粉灌浆充分,籽粒饱满,粒叶比、百粒重、出籽率均高于对照(表 4)。

### 2.3 玉米各生长势指标的增长速率变化趋势特征

A 处理玉米生长动态速率曲线形态呈现左尾短、右尾长、高峰高于对照且偏左的特点(图 2),B 和 C 处理曲线高峰则偏右。由图 3、表 3 可知,3 种处理最大生长速率变化趋势与生长起始势变化趋势相同,各指标最大生长速率( $t_{pio}$  拐点,图 2 中曲线峰值,图 3 中速率变化率曲线与  $x$  轴的交点即速率变

化率为 0 的点)出现的时间 A 处理最高也最早,C 处理最低也最迟(图 2,表 3),处理 A 的株高最大增长速率为  $6.755\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ ,是对照的 1.384 倍。

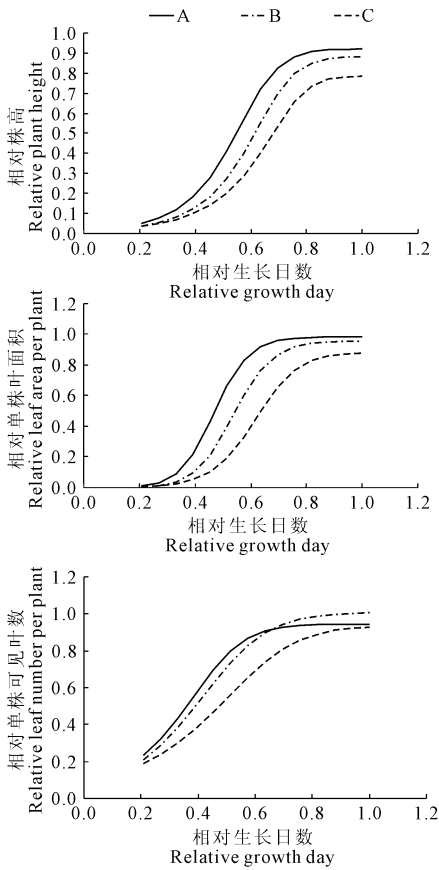


图 1 3 个处理玉米生长动态 Richards 曲线  
Fig.1 Richards curves for growth dynamics of maize by three treatments

表 2 各处理玉米关键生育时期(M-d)

Table 2 The growth periods of maize by various treatments

| 处理<br>Treatment | 播种<br>Sowing<br>stage | 出苗<br>Seedling<br>stage | 拔节<br>Jointing<br>stage | 大喇叭口<br>Huge bell<br>bottom stage | 抽雄<br>Heading | 扬花<br>Blooming<br>period | 吐丝<br>Silking<br>stage | 成熟<br>Maturing<br>stage |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|
| A               | 04-30                 | 05-10                   | 06-17                   | 07-05                             | 07-19         | 07-25                    | 07-28                  | 10-02                   |
| B               | 04-30                 | 05-13                   | 06-28                   | 07-14                             | 07-24         | 07-29                    | 07-31                  | 10-08                   |
| C               | 04-30                 | 05-15                   | 07-05                   | 07-19                             | 07-28         | 08-01                    | 08-04                  | 10-14                   |

单株绿叶面积最大增长速率为  $330.6\text{ cm}^2\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{株}^{-1}$ ,是对照的 1.391 倍。单株可见叶数最大增长速率最高的为 A 处理,为  $0.412\text{ 片}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{株}^{-1}$ ,是对照的 1.383 倍。同一处理各指标拐点值  $t_{pio}$ 、 $t_1$ 、 $t_2$  呈现相近的变化趋势(表 3、图 2、图 3)。A 处理株高、单株绿叶面积、单株可见叶数生长进入指数和稳定生长阶段要比 B、C 处理早,初始生长阶段均比 B、C 处理短,为 C 处理的 73.6%~78.9%。指数生长

阶段株高比 B、C 处理长,为 C 处理的 1.069 倍,单株绿叶面积、单株可见叶数比 B、C 处理短,为 C 处理的 73.6%~82.8%。各指标稳定生长阶段处理 A 比处理 B、C 长,为 C 处理的 1.493~1.618 倍。

不同处理各指标拐点  $t_{pio}$ 、 $t_1$ 、 $t_2$  出现的日期与对应生育时期(表 2,表 3)不同,单株可见叶数速率变化率三拐点出现最早,单株绿叶面积次之,株高最迟(图 3)。

表 3 各处理玉米株高、单株叶面积、单株叶片数与播后生长日数的 Richards 方程曲线拐点和三个生长阶段参数

| Table 3 Richards curve inflection points of maize plant height, leaf area, leaf number and the number of days after sowing, and parameters of three growth stages |                      |                                             |                  |                  |                                                                  |           |         |                                                               |                                  |                             |                                                            |                                  |                             |                          |                                                                     |                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------|------------------|------------------|------------------------------------------------------------------|-----------|---------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 生长势<br>指标<br>Index<br>of<br>growth                                                                                                                                | 处理<br>Treat-<br>ment | 拐点相对值<br>Inflection point<br>relative value |                  |                  | 拐点对应日期<br>(M - d)<br>Inflection point corresponds<br>to the date |           |         | 生长阶段<br>日数所占比例<br>The proportion of the<br>growth stages days |                                  |                             | 各阶段与 CK 比较<br>Each stage compared with<br>CK magnification |                                  |                             | 最大<br>速率<br>Max.<br>rate | 最大速率<br>时生长量<br>比值<br>The ratio<br>of the<br>max. rate<br>of growth | 生长起<br>始势<br>The<br>initial<br>growth<br>potential |
|                                                                                                                                                                   |                      | $t_1$                                       | $t_{poi}$        | $t_2$            | $t_1$                                                            | $t_{poi}$ | $t_2$   | 初始<br>阶段<br>Initial<br>stage                                  | 指数<br>阶段<br>Exponential<br>phase | 稳定<br>阶段<br>Stable<br>stage | 初始<br>阶段<br>Initial<br>stage                               | 指数<br>阶段<br>Exponential<br>phase | 稳定<br>阶段<br>Stable<br>stage |                          |                                                                     |                                                    |
|                                                                                                                                                                   |                      | $Y_1$                                       | $Y_{poi}$        | $Y_2$            |                                                                  |           |         |                                                               |                                  |                             |                                                            |                                  |                             |                          |                                                                     |                                                    |
| 株高<br>Plant<br>height<br>/cm                                                                                                                                      | A                    | 0.4654<br>0.3031                            | 0.5660<br>0.5466 | 0.6666<br>0.7821 | 06 - 23                                                          | 07 - 04   | 07 - 16 | 0.465                                                         | 0.201                            | 0.333                       | 0.789                                                      | 1.069                            | 1.493                       | 6.755                    | 0.594                                                               | 7.077                                              |
|                                                                                                                                                                   | B                    | 0.5251<br>0.2970                            | 0.6253<br>0.5290 | 0.7255<br>0.7529 | 06 - 29                                                          | 07 - 11   | 07 - 22 | 0.525                                                         | 0.200                            | 0.275                       | 0.891                                                      | 1.064                            | 1.233                       | 6.171                    | 0.599                                                               | 6.906                                              |
|                                                                                                                                                                   | C                    | 0.5886<br>0.3114                            | 0.6827<br>0.5052 | 0.7768<br>0.6897 | 07 - 07                                                          | 07 - 18   | 07 - 28 | 0.589                                                         | 0.188                            | 0.223                       | 1.000                                                      | 1.000                            | 1.000                       | 4.880                    | 0.643                                                               | 5.837                                              |
| 单株叶<br>面积<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{株}^{-1}$ )<br>Leaf<br>area<br>( $\text{m}^2 \cdot \text{plant}^{-1}$ )                                                     | A                    | 0.3835<br>0.1940                            | 0.4654<br>0.4805 | 0.5474<br>0.7687 | 06 - 13                                                          | 06 - 24   | 07 - 02 | 0.384                                                         | 0.164                            | 0.453                       | 0.736                                                      | 0.828                            | 1.618                       | 330.580                  | 0.487                                                               | 17.866                                             |
|                                                                                                                                                                   | B                    | 0.4432<br>0.1862                            | 0.5343<br>0.4650 | 0.6255<br>0.7458 | 06 - 20                                                          | 06 - 30   | 07 - 11 | 0.443                                                         | 0.182                            | 0.374                       | 0.849                                                      | 0.919                            | 1.336                       | 289.388                  | 0.485                                                               | 16.354                                             |
|                                                                                                                                                                   | C                    | 0.5225<br>0.2067                            | 0.6214<br>0.4579 | 0.7203<br>0.7072 | 06 - 29                                                          | 07 - 11   | 07 - 22 | 0.522                                                         | 0.198                            | 0.280                       | 1.000                                                      | 1.000                            | 1.000                       | 237.741                  | 0.519                                                               | 11.483                                             |
| 单株<br>叶数<br>Leaf<br>number<br>per<br>plant                                                                                                                        | A                    | 0.2563<br>0.3003                            | 0.3848<br>0.5530 | 0.5134<br>0.7981 | 05 - 30                                                          | 06 - 13   | 06 - 29 | 0.256                                                         | 0.257                            | 0.487                       | 0.762                                                      | 0.736                            | 1.546                       | 0.412                    | 0.585                                                               | 5.820                                              |
|                                                                                                                                                                   | B                    | 0.2609<br>0.2734                            | 0.4188<br>0.5545 | 0.5768<br>0.8309 | 05 - 30                                                          | 06 - 18   | 07 - 05 | 0.261                                                         | 0.316                            | 0.423                       | 0.777                                                      | 0.905                            | 1.343                       | 0.376                    | 0.548                                                               | 5.906                                              |
|                                                                                                                                                                   | C                    | 0.3358<br>0.3087                            | 0.5102<br>0.5574 | 0.6846<br>0.7980 | 06 - 08                                                          | 06 - 28   | 07 - 18 | 0.336                                                         | 0.349                            | 0.315                       | 1.000                                                      | 1.000                            | 1.000                       | 0.298                    | 0.594                                                               | 4.097                                              |

注: 生长势指标测定最大值中株高为 A 处理 288.6 cm, 单株叶面积为 A 处理 9 491.45 cm<sup>2</sup>, 单株叶数为 B 处理 21.6 片。  
Note: Determination of the maximum value of the growth potential of the plant height for the A treatment was 288.6 cm, the leaf area per plant for the A treatment was 9 491.45 cm<sup>2</sup>, and the number of leaves per plant for B processing was 21.6.

表 4 各处理玉米植株性状及产量  
Table 4 Maize plant traits and yield by each treatment

| 处理<br>Treatment | 株高<br>Plant<br>height<br>/cm | 穗粗<br>Ear<br>diameter<br>/cm | 穗长<br>Spike<br>length<br>/cm | 穗粒数<br>Grain<br>number<br>per spike | 穗粒重<br>Grain<br>weight per<br>spike<br>/g | 秃顶长<br>Length of<br>baldhead<br>/cm | 百粒重<br>100-grain<br>mass<br>/g | 粒叶比<br>Grain-leaf<br>ratio<br>/(kernels·cm <sup>-2</sup> ) | 产量<br>Yield<br>/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 与对照相<br>比增产<br>Compared with<br>CK<br>/% |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| A               | 288.6                        | 5.60                         | 19.5                         | 592.80                              | 270.9                                     | 1.000                               | 45.70                          | 0.0625                                                     | 15990.9                                | 33.8                                     |
| B               | 276.0                        | 5.28                         | 17.2                         | 518.00                              | 229.7                                     | 0.875                               | 44.34                          | 0.0570                                                     | 13629.8                                | 14.0                                     |
| C               | 247.4                        | 5.12                         | 16.3                         | 473.28                              | 199.3                                     | 0.750                               | 42.10                          | 0.0576                                                     | 11955.0                                |                                          |

生长速率达最大时的指标生长量与生长终量的百分比,C 处理高于 A 处理,相应指标达到最大生长速率时已完成生长终量的 60%左右,说明后期植株增长受到明显的限制。

### 3 讨 论

1) 不同栽培模式玉米有自身的生长发育特征,全膜双垄沟播玉米株高、单株叶面积、单株可见叶数进入指数和稳定生长阶段明显偏早,生长起始势  $R_0$  高,最大生长速率及出现的时间都明显高于和早于

露地对照,稳定增长阶段较 CK 明显增加。  
3 种处理株高、单株叶面积、单株可见叶数生长积累量均呈“慢—快—慢”的 S 型 Richards 模型曲线变化,即前期初始阶段增长缓慢,中期指数阶段增长迅速,此后在稳定阶段又趋于缓慢直至达到最大值。但全膜双垄沟播玉米植株生长势 Richards 动态模型曲线形态及参数与半膜和露地对照差异明显,3 个生长势指标的最大生长速率及出现的时间都呈现相近的特点:全膜双垄处理数值最高,出现时间也最

早,半膜处理次之,露地数值最低,出现时间最迟。株高和单株叶面积终极生长量全膜双垄沟播玉米最大,半膜覆盖次之,露地对照最小。单株叶数终极生长量则 3 种处理基本一致,累积生长曲线末端基本粘合,说明玉米总叶数相同,这与玉米品种的叶片数目在同一地区基本稳定的特性一致<sup>[15]</sup>。

单株叶面积与单株叶数达到稳定生长阶段的时间早于株高,在 7 月 3—4 日正值株高最大增长速率期时单株叶面积与单株叶数即进入到稳定增长阶段,此时正值玉米大喇叭口期,是穗分化的旺盛期,这是决定穗大粒多的关键时期。株高完成了终极生长量的 55%,开始快速生长,而单株叶面积完成了终极生长量的 75%,单株叶数则完成了终极生长量的 80%,进入后期稳定生长阶段。说明全膜双垄处理前期单株叶面积的增加是依靠单株展开叶数多来实现的。也说明了玉米生长势指标增长的先后顺序及速度各有特点,生长过程就是这样相互协调有规律地推进着,不同栽培模式间玉米生长势指标增长的先后顺序一致,生长发育特征差异主要体现在各玉米生长势指标的增长速度上。

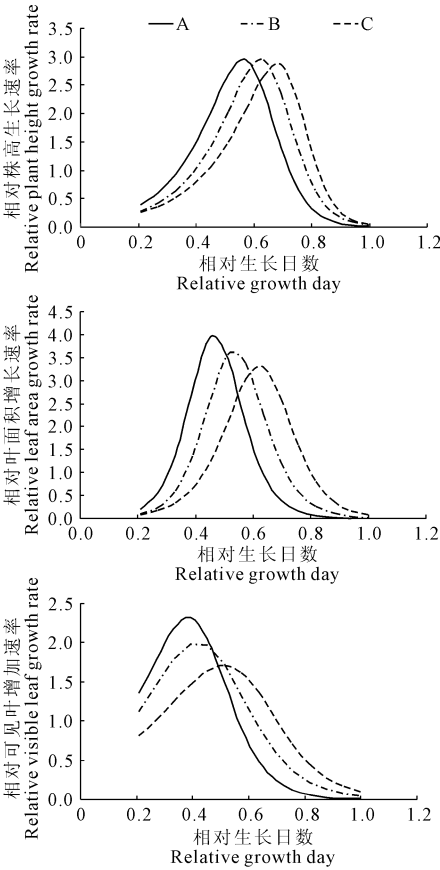


图 2 3 个处理玉米生长动态速率曲线

Fig.2 Dynamic growth rate curves of maize by three treatments

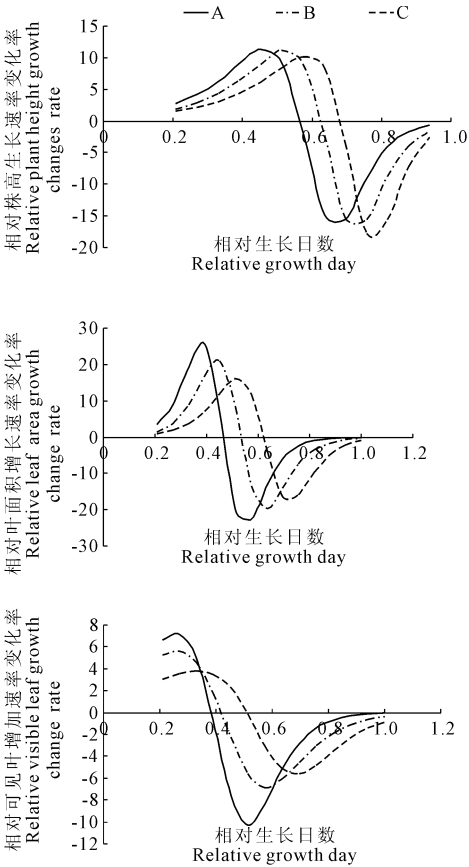


图 3 3 个处理玉米生长动态速率变化率曲线

Fig.3 Variation curves in growth dynamic rates of maize by three treatments

作物叶片是影响作物光合效率的最重要因素之一,叶片数量的多少更是直接影响到光合效率和产量的高低<sup>[16]</sup>,由玉米的穗分化自身的规律性可知,叶片的出生数(可见叶数和展开叶数)也与穗分化有着明显的稳定对应关系。与各营养器官生长均有着一定的相关性<sup>[15-18]</sup>,单株叶数最大增长速率出现时间在拔节期前 1~10 d,全膜双垄处理最早,露地处理最迟。此时的叶龄指数(相对可见叶数乘 100 即为叶龄指数)在 55% 左右,正值雄穗分化期和雌穗小穗分化期。全膜双垄处理前期出叶速度快,叶面积扩展迅速,叶龄指数高,相应的穗分化及营养器官生长提前,生育进程加快,进入快速增长阶段早,极早达成了丰产架子。

A 处理百粒重出籽率均高于对照 C 处理(表 3),与稳定生长阶段比 C 处理明显增长有关,生育期内生殖生长阶段占比例高,后期绿叶光合面积持续稳定期长<sup>[21]</sup>,提高了光能利用率。授粉灌浆充分,籽粒饱满,百粒重出籽率均高于对照,利于高产<sup>[22]</sup>。

不同处理玉米株高、单株叶面积、单株叶片数的生长起始势( $R_0$ )反映了植株长势指标性状的

潜势,全膜双垄沟播玉米  $R_0$  值大,相应长势指标性状增长速度快,进入快速生长阶段早。其达到最大生长量的时间早于起始势  $R_0$  小的处理。

2) 全膜双垄沟播玉米各指标的生长累积 Richards 曲线和生长速率及速率变化率曲线形态与对照相比有明显差异。

动态速率曲线是一连续变化的单峰曲线,曲线峰值即为生长速率的最大值。全膜双垄沟播玉米各指标最大生长速率期与对照相比差异明显,动态速率曲线呈现左尾短、右尾长、高峰高于对照且偏左的特点,所有指标的生长速率最大值出现时间都早于对照。动态速率变化率曲线极大值是初始增长阶段进入指数增长阶段的拐点,极小值点是指数增长阶段进入稳定增长阶段的拐点,曲线与 X 轴的交点是增长速率最大值出现的拐点。全膜双垄沟播玉米各指标增长速率变化率极大值都大于对照,极小值都小于对照,增长速率变化幅度较大,呈现增长速率加速快但减速也快的特点。

3) 半膜覆盖垄作处理玉米的各个生长势指标随生长日数的变化幅度和关键时点均介于全膜双垄沟播与露地玉米之间,说明半膜覆盖垄作处理对玉米植株生长的影响明显低于全膜双垄沟播处理。

4) 本研究为了减少取样引起的个体间的误差,提高模型拟合的模拟精度,仅选取了对玉米产量及长势影响较大且便于活体跟踪测量的 3 个性状指标进行模型拟合,但对于单株生物量等其他性状及生理指标随时间变化的模型研究有待进一步进行。

## 4 结 论

不同栽培模式各生长势指标随生长日数的增加呈“慢—快—慢”的 S 型 Richards 模型曲线变化,即前期初始阶段增长缓慢,中期指数阶段增长迅速,此后在稳定阶段又趋于缓慢直至达到最大值。全膜双垄沟播玉米株高、单株叶面积、单株可见叶数生长势指标进入指数和稳定生长阶段早,各生长势指标最大生长速率及出现的时间都明显高于和早于露地对照,稳定增长阶段增加。可以使玉米生育期提前,有利于作物生长发育时间和灌浆时间的延长,增产效果更加显著。全膜双垄沟播玉米生长起始势高,生长速率变化幅度大,呈现加速快但减速也快的特点。全膜双垄模式粒叶比高,库容足,源库协调性好,产量高。半膜覆盖垄作处理对玉米产量及植株生长的影响明显低于全膜双垄沟播模式,生产中应继续推广全膜双垄沟播技术模式来替代传统的半膜覆盖垄作模式,并针对生长势性状模型曲线特征进行农艺管理,进而实现玉米高产。

**致谢:**甘肃省榆中县农业技术推广中心的农艺师何秀云参加了本研究的田间试验记载等工作,谨致谢忱。

## 参 考 文 献:

- [1] 赵凡. 旱地玉米全膜覆盖双垄面集雨沟播栽培技术[J]. 甘肃农业科技, 2004, (11): 23-24.
- [2] 赵凡. 玉米双垄面集雨全膜覆盖技术优势及应用前景[J]. 耕作与栽培, 2005, (6): 62-63.
- [3] 赵凡. 玉米双垄全膜模式土壤水分与降水的灰色关联分析及水分利用率研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 89-94.
- [4] 方彦杰, 黄高宝, 李玲玲, 等. 旱地全膜双垄沟播玉米生长发育动态及产量形成规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 128-134.
- [5] 赵凡, 金胜利, 张光全. 旱地全膜双垄栽培条件下玉米穗部性状的数量关系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 79-85.
- [6] 赵凡, 崔增团. 高海拔旱作农业区全膜双垄沟播玉米肥料效应研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(4): 62-68.
- [7] 赵凡, 陈政仁. 全膜双垄沟播玉米密度对产量及植株性状的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 125-133.
- [8] 李向岭, 李从峰, 侯玉虹, 等. 不同播期夏玉米产量性能动态指标及其生态效应[J]. 中国农业科学, 2012, 45(6): 1074-1083.
- [9] 乔嘉, 朱金城, 赵娇, 等. 基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(5): 32-38.
- [10] 邢黎峰, 孙明高, 王元军. 生物生长的 Richards 模型[J]. 生物数学学报, 1998, 13(3): 348-353.
- [11] 程毛林. Richards 模型参数估计及其模型应用[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(12): 139-144.
- [12] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000: 458-516.
- [13] 侯玉虹, 陈传永, 郭志强, 等. 作物高产群体干物质积累动态模型的构建及生长特性分析[J]. 玉米科学, 2008, 16(6): 90-95.
- [14] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [15] 曹彬, 屈森泉, 薛秋云, 等. 夏玉米叶片出生与穗分化关系的研究初报[J]. 杂粮作物, 2003, 23(4): 208-221.
- [16] 郭庆法. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986: 171-376.
- [17] 曹彬, 张世杰, 孙占玉, 等. 玉米叶龄指数与穗分化回归关系的研究初报[J]. 玉米科学, 2005, 13(1): 86-88.
- [18] 张养利, 李进仓, 张德仓. 16 个玉米新品种叶龄指数与穗分化关系的试验初报[J]. 陕西农业科学, 2009, (5): 14-17.
- [19] 赵龙飞, 李潮海, 刘天学, 等. 花期前后高温对不同基因型玉米光合特性及产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4947-4958.
- [20] 陶志强, 陈源泉, 隋鹏, 等. 华北春玉米高温胁迫影响机理及其技术应对探讨[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(4): 20-27.
- [21] 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[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 178-184.
- [22] 靳小利, 杜雄, 刘佳丽, 等. 黄淮海平原北部高产夏玉米群体生理指标研究[J]. 玉米科学, 2012, 20(1): 79-83.