

# 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴同步发育特性研究

马红珍<sup>1</sup>,许海涛<sup>1</sup>,王斌功<sup>2</sup>,冯晓曦<sup>1</sup>,郭海斌<sup>1</sup>,许波<sup>1</sup>,  
张军刚<sup>1</sup>,王友华<sup>1</sup>,王成业<sup>1</sup>,葛凤梅<sup>2</sup>

(1.驻马店市农业科学院/河南玉米产业技术体系驻马店综合试验站,河南 驻马店 463000; 2.上蔡县农业农村局,河南 上蔡 463800)

**摘要:** 2022-2023年在河南和海南以玉米自交系驻85、驻136、ZM3358为试验材料,研究自交系苞叶与穗轴同步发育特性。结果表明,河南苞叶驻85第1~7 d伸长迅速,速增期与ZM3358一致,低于驻136;穗轴,驻85第1~11 d急剧伸长。海南苞叶ZM3358伸长速增期为13 d,比驻85、驻136延长2~3 d;穗轴ZM3358伸长渐增期最长为19 d,显著高于驻85、驻136。河南苞叶驻85宽度持续变宽,驻136苞叶宽度第11 d开始增幅变缓,ZM3358苞叶宽度速增期最短为7 d;穗轴粗度驻136第1~17 d持续变粗,第19 d稍有下降。海南ZM3358苞叶宽度速增期为13 d,驻85、驻136苞叶宽度速增期均为9 d;驻85穗轴粗度速增期最长为19 d,苞叶与穗轴可保持同步发育特性。

**关键词:** 玉米;自交系;苞叶;穗轴;同步发育;Logistic模型

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

## Study on the Synchronous Development Characteristics of Husk and Cob of Maize Inbred Lines in Different Ecological Regions

MA Hong-zhen<sup>1</sup>, XU Hai-tao<sup>1</sup>, WANG Bin-gong<sup>2</sup>, FENG Xiao-xi<sup>1</sup>, GUO Hai-bin<sup>1</sup>, XU Bo<sup>1</sup>,  
ZHANG Jun-gang<sup>1</sup>, WANG You-hua<sup>1</sup>, WANG Cheng-ye<sup>1</sup>, GE Feng-mei<sup>2</sup>

(1. Zhumadian Academy of Agricultural Science / Zhumadian Comprehensive Experimental Station of Henan Maize Industrial Technology System, Zhumadian 463000;  
2. Shangcai County Agriculture and Rural Bureau, Shangcai 463800, China)

**Abstract:** Zhu85, Zhu136 and ZM3358 were conducted to study the synchronous development characteristics of husk and cob in 2022 and 2023. The results showed that the husk in Henan extended rapidly on the 1st-7th day of Zhu85, and the rapid growth period of husk was consistent with that of ZM3358, but lower than that of Zhu136, the cob of Zhu85 increased sharply on the 1st-11th day. In Hainan, ZM3358 husk elongation rapid increase period was 13 days, which was 2-3 days longer than that of Zhu85 and Zhu136, and ZM3358 cob elongation gradual increase period was 19 days, which was significantly higher than that of Zhu85 and Zhu136. The husk width of Zhu85 in Henan continued to widen, and the husk width of Zhu136 began to slow down on the 11th day, ZM3358 husk width rapid growth period is the shortest 7 days, the cob diameter of Zhu136 continued to thicken on the 1-17th day, and slightly decreased on the 19th day. The rapid growth period in husk width of ZM3358 in Hainan is 13 days, and the growth period in husk width of Zhu85 and Zhu136 is 9 days, and the maximum rapid growth period in cob diameter of Zhu85 is 19 days. The husk and cob could maintain synchronous development characteristics.

**Key words:** Summer maize; Inbred line; Husk; Cob; Synchronous development; Logistic model

录用日期: 2023-03-06

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(2024627)、河南现代玉米产业技术体系驻马店综合试验站建设项目(Z2022-02-04)

作者简介: 马红珍(1983-),女,河南尉氏人,博士,助理研究员,主要从事作物栽培与耕作、分子生物育种研究。

Tel: 17639661363 E-mail: 17639661363@126.com

许海涛为本文共同第一作者。E-mail: xuht0101@126.com

王斌功为本文通信作者。E-mail: nyjwb@126.com

玉米(*Zea mays* L.)源产于中美洲国家的墨西哥、危地马拉以及洪都拉斯,也有学者认为源产地位于巴尔萨斯河谷地<sup>[1]</sup>。苞叶由雌穗柄部叶鞘发育而成的变态叶,是营养物质储存的暂存库,苞叶具有的光合特性可为雌穗转运碳水化合物,为雌穗发育提供适宜环境,为子粒发育提供合适温度,可减缓降温引起的冻害<sup>[2,3]</sup>。已有研究发现,苞叶含有多种光合组织<sup>[4,5]</sup>,具有高光合物质转化率<sup>[6]</sup>,光合作用的苞叶面积约占植株全面积7.7%,对雌穗干物质累积的贡献率约15%,对子粒发育具有较大作用<sup>[7]</sup>。徐洪文等<sup>[8]</sup>研究表明,玉米苞叶的叶绿素含量不同生育时期表现出先升高后下降趋势,灌浆期达最大值,其荧光参数( $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$ )也呈相同趋势。

前人已在苞叶性状和成熟时子粒脱水速率、子粒含水量方面研究获得较大进展,苞叶与果穗长度比值、苞叶长度与生理成熟期子粒脱水速率表现为显著负相关关系<sup>[9]</sup>,成熟期苞叶层数、苞叶含水量与子粒含水量呈正相关性,达极显著水平,苞叶宽度与子粒含水量也表现显著正相关关系。苞叶过短或过长、过厚均不宜于子粒的生育与收获,苞叶的包紧度、重量、层数过多或过大也会使子粒脱水速率下降<sup>[10]</sup>。玉米穗轴是由大刍草 *tgal* 基因内的一个核苷酸突变引起的,突变导致大刍草外壳裂开变小,形成的种子后代与大刍草经天然杂交后获得中间型产物,天然自交数代产生现今玉米雏型;大刍草稃壳是子房壁发育而成,也是果实的果皮;玉米穗轴是由数个子房壁发育而成果皮的集合体<sup>[11]</sup>。有文献报道,玉米子粒含水量和穗轴含水量、穗轴重呈显著性正相关性<sup>[12,13]</sup>,子粒脱水速率和穗轴呈现极显著正相关性<sup>[14]</sup>。有文献报道穗轴粗、穗轴长和子粒性状呈显著相关关系<sup>[15]</sup>。王成伟等<sup>[16]</sup>研究发现,中单909和安农597两个玉米品种的穗轴伸长动态呈“S”型生

长变化曲线,历经“渐增期—速增期—缓增期”3个生育时期。

在大陆生态区对玉米自交系优良性状进行选择,在海南热带生态区进行加代已成为玉米育种研究者不可或缺的工作<sup>[17]</sup>。对不同生态区玉米自交系苞叶、穗轴同步发育的差异性研究在已公开文献中还未见相关报道。本文在河南驻马店(属半湿润暖温带季风型大陆性气候)、海南乐东(属热带季风气候)不同生态区对玉米自交系雌穗苞叶、穗轴同步发育的差异变化进行研究,明确苞叶与穗轴同步发育关系及不同生态区间的变化特点,为玉米自交系雌穗苞叶、穗轴性状的改良选育提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

2022–2023年试验分别安排在河南驻马店农业科学试验站(驿城区,33°0′27″N,114°2′43″E,海拔71 m)、海南乐东县九所镇南繁基地(九所镇,18°26′40″N,108°57′36″E,海拔45 m)。驻马店试验点位于河南南部,该区处于黄淮河流域,属暖温带过渡亚热带的过渡地带,典型大陆性季风型半湿润气候,热量资源丰富,阳光充足,雨量丰沛;前茬种植为小麦,土壤类型为砂姜黑土,地势平整,旱可浇涝可排,肥力一致均匀。九所试验点位于海南岛的西南部,光热资源充沛,属典型热带季风型气候,试验期间干旱少雨,玉米生长发育所需水分以人工灌水为主,土壤类型为砂质壤土,砂质含量为67.82%。

玉米雌穗苞叶与穗轴生长发育期间气温、日照时数见图1。采用Elitech RC-4HC记录最高与最低气温,人工实时记录试验田间的日日照时数。河南驻马店2022年7月15日至8月15日苞叶与穗轴生长发育期间最高气温为29~39℃,最低气温为20~

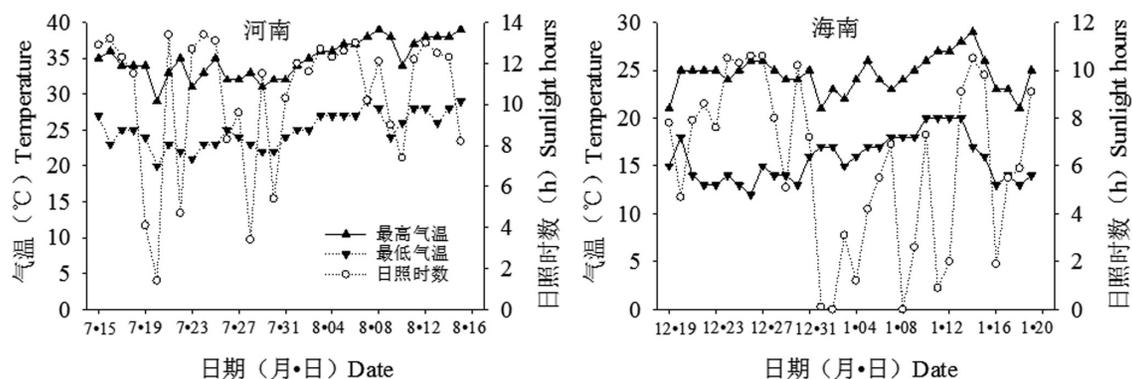


图1 2022–2023年不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴生长发育期间气温与日照时数

Fig.1 Temperature and sunshine hours during the growth period of husk and cob of maize inbred lines in different ecological regions from 2022 to 2023

29℃,日日照时数为1.4~13.4 h,平均日日照时数为10.4 h;海南九所镇2022年12月19日至2023年1月19日苞叶与穗轴生长发育期间最高气温为21~29℃,最低气温为12~20℃,日日照时数为0~10.6 h,平均日日照时数为6.1 h。河南驻马店与海南九所镇点最高气温相差8~10℃,最低气温相差8~9℃,平均日日照时数相差4.3 h。

### 1.2 试验材料

试验玉米自交系分别为驻85、驻136、ZM3358,其中驻85、驻136属于Reid类群,ZM3358属于Lancaster类群,均为驻马店市农业科学院玉米所自选骨干自交系。

### 1.3 试验设计

采用随机区组试验设计,3次重复,重复间1 m走道,试验小区的行长为6 m,6行区,行距60 cm,试验小区面积为21.6 m<sup>2</sup>,周围种植2行玉米作为保护行。

河南驻马店试验点旋耕前施专用玉米复合肥(山西中能晋化化工有限公司生产,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O含量分别为30%、5%、5%,养分总含量≥40%)975 kg/hm<sup>2</sup>。2022年5月16日人工点播,播种深度约4~5 cm,每穴播3粒,播前人工浇水造墒,确保苗全苗壮,5月25日出苗,5月30日定苗,留苗密度为7.5万株/hm<sup>2</sup>,田间管理同当地大田生产。

海南九所镇试验点按照本地种植与施肥习惯采用垄作模式,2022年11月6日旋耕,11月8日施肥

起垄,人工先犁1行沟,复合肥与尿素集中撒施于沟内作为基肥,复合肥(贵州诺威施生物工程有限公司生产,N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O含量分别为16%、16%、16%,养分总含量≥48%)施用量为900 kg/hm<sup>2</sup>,尿素(河北正元氢能科技有限公司生产,N含量为46%)施用量215 kg/hm<sup>2</sup>,从两侧向沟内各翻犁1次形成垄面,用钉耙除去杂草同时耙平垄面。垄高为20 cm,垄间距为60 cm。11月9日在垄面中间人工点播,每穴点种2粒,留苗密度7.5万株/hm<sup>2</sup>。11月11日喷灌出苗水,确保能够足墒出苗;11月16日出苗,11月22日定苗;12月3日追施复合肥1 200 kg/hm<sup>2</sup>,复合肥撒施垄面玉米根部,从垄面两侧沟底用牛工翻犁土壤进行覆肥培垄。玉米生长发育期内少雨干旱,所需水分主要为人工喷灌供水,其他管理与本地的大田生产一致。

### 1.4 测定项目与方法

每个小区选择生长健壮、长势基本一致、无病虫害危害的植株,雌穗抽出叶鞘约1 cm时开始挂吊牌标记50株,记录雌穗抽出的开始日期,并从当日进行取样,取样时先剥开穗位叶,使雌穗完全露出,再把雌穗完整取出,迅速放入自封袋内密封,标记样品及取样日期,所取样品置于存有冰块的泡沫箱内,密封后带回室内对项目进行测定,每次取样5株,之后每隔1 d取样1次,共取10次。不同自交系取样开始与结束日期见表1。

表1 不同玉米自交系取样开始与结束日期

Table 1 Sampling start and end dates of different maize inbred lines

自交系 Inbred line	河南 Henan		海南 Hainan	
	开始日期 Start date	结束日期 End date	开始日期 Start date	结束日期 End date
驻85	2022-07-19	2022-08-06	2022-12-27	2023-01-14
驻136	2022-07-15	2022-08-02	2022-12-23	2023-01-10
ZM3358	2022-07-20	2022-08-07	2022-12-29	2023-01-16

收取样品室内先把雌穗苞叶从外向内依次逐层完全剥离下来,每层苞叶铺平,用分度值0.1 cm直尺测量苞叶长度,求其平均值;距苞叶底端1/3处测量苞叶宽度,求其平均值。

$$\text{苞叶长度平均值计算公式: } L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$$

其中, $L_i$ 为苞叶长度; $n$ 为苞叶数。

$$\text{苞叶宽度平均值计算公式: } W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i$$

其中, $W_i$ 为苞叶宽度; $n$ 为苞叶数。

每次取样计算最长苞叶长度与穗轴长度的比值(LR)。

用分度值0.01 g天平测量苞叶鲜重;排水法<sup>[17]</sup>测量苞叶体积(mL)。用分度值0.1 cm直尺测量穗轴长度;分度值0.01 mm游标卡尺于穗轴底端1/3处测量穗轴直径(包含子粒);用分度值0.01 g天平测量穗轴鲜重;排水法测量穗轴体积(mL)。

通过Logistic方程对苞叶与穗轴鲜重、体积同步

发育动态进行拟合,其拟合方程:

$$y=y_0+\frac{a}{1+\left(\frac{x}{x_0}\right)^b}$$

其中,  $y_0$  为初始理论参数,  $a$  为最高理论参数限值,  $x_0$  为  $y$  达最高理论参数值 50% 时的发育日数,  $b$  为冥由 Logistic 自动生成。

### 1.5 数据处理与分析

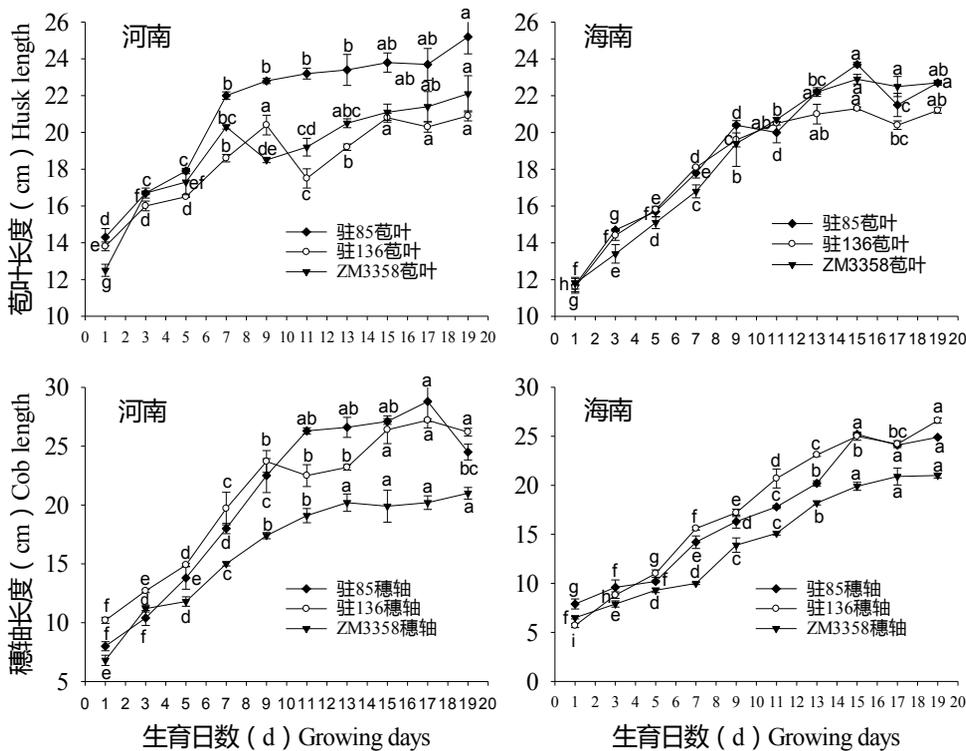
采用 IBM SPSS Statistics 19 对试验数据进行处理分析,采用 Sigmaplot 14.0 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴伸长同步发育动态

由图 2 可知,不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴伸长基本呈“S”型曲线变化动态,苞叶与穗轴伸长经历“速增期-缓增期”2 个过程,速增期为生育前期苞叶与穗轴日均伸长量较大的时期,伸长迅速,速增期河南生态区可维持 1~7 d,海南生态区比河南延长了 7 d 左右,速增期后苞叶与穗轴日均伸长量降低,差异较小。进入缓增时期,苞叶与穗轴变化趋势不尽一致,河南生态区和海南生态区苞叶与穗轴变

化幅度存在一定差异。河南生态区自交系苞叶与穗轴渐增期显著低于海南生态区,河南生态区苞叶第 1~7 d 伸长迅速增加,第 9~19 d 缓慢增加;海南生态区苞叶第 1~15 d 伸长迅速增加,之后缓慢增加。河南生态区穗轴 9~13 d 内迅速伸长,第 15~19 d 伸长缓慢;海南生态区穗轴第 1~15 d 伸长较快,之后伸长变缓。河南生态区自交系驻 85 苞叶伸长随生育过程的推进呈持续增加的趋势,第 1~7 d 苞叶伸长幅度较大,第 9 d 后伸长平稳,直至停止伸长,苞叶速增期与 ZM3358 一致,但低于驻 136;驻 136、ZM3358 苞叶伸长呈先升高后下降再升高的变化趋势,ZM3358 苞叶整体伸长速度显著高于驻 136。海南生态区自交系驻 85、驻 136、ZM3358 苞叶伸长整体随生育过程的推进呈逐渐增加的变化趋势,ZM3358 苞叶伸长速增期为 13 d,比驻 85、驻 136 速增期分别延长了 3 d、2 d;驻 85、驻 136 苞叶前期伸长比较快。穗轴伸长动态与苞叶伸长幅度变化不尽相同,河南生态区自交系驻 85、驻 136、ZM3358 穗轴第 9~13 d 急剧增加,穗轴伸长较快,之后平缓伸长;驻 85 穗轴第 1~11 d 急剧伸长,穗轴速增期大于驻 136,而显著低于 ZM3358。驻 136、ZM3358 分别于第 9 d、13 d 迅速伸长后而进入缓增时期,驻 136 穗轴



注:同一自交系不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。下图、下表同。

Note: Different lowercase letters of the same inbred line indicate a significant difference in the 5% level. The same below.

图 2 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴长度发育动态

Fig.2 Synchronous development dynamics of husk and cob length of maize inbred lines in different ecological regions

长度可较快形成;海南生态区自交系驻 85、驻 136、ZM3358 穗轴伸长动态变幅相近,ZM3358 穗轴伸长呈直线渐增,渐增期最长为 19 d,生育时期长,显著高于驻 85、驻 136,驻 85、驻 136 穗轴伸长渐增期均为 15 d,之后平稳伸长,海南生态区穗轴伸长时期均大于河南生态区。

由表 2 可知,最长苞叶长度、穗轴长度不同生态区存在一定差异。自交系驻 85 第 1 天最长苞叶长度河南比海南短 1.9 cm,第 3 d 至取样结束,河南最长苞叶长度均高于海南,不同生育时期比海南高 0.4 ~ 2.8 cm;河南穗轴长度大于海南,比海南大 0.1 ~ 8.5 cm。不同生态区驻 136 最长苞叶长度变化与驻 85 不同,河南最长苞叶长度低于海南,比海南短 0.5 ~ 4.9 cm;第 1 ~ 9 天河南穗轴长度比海南大,比

海南大 3.9 ~ 5.1 cm,9 d 后海南穗轴长度生长加快,河南穗轴长度比海南短 0.6 ~ 1.9 cm。ZM3358 河南最长苞叶长度大于海南,比海南大 0 ~ 3.1 cm,穗轴长度比海南长 0 ~ 3.5 cm。不同生态区玉米自交系在不同生育时期,最长苞叶长度均大于穗轴长度,但变化幅度存在一定差异。河南生态区第 1 ~ 3 天,驻 85、驻 136、ZM3358 最长苞叶长度与穗轴长度的比值为 1.5 ~ 3.0,3 d 后随生育进程最长苞叶长度与穗轴长度的比值接近于 1.0;海南生态区第 1 ~ 9 天,驻 85、驻 136、ZM3358 最长苞叶长度与穗轴长度的比值为 1.5 ~ 3.3,9 d 后随生育进程最长苞叶长度与穗轴长度的比值接近于 1.0,不同生态区玉米自交系苞叶长度与穗轴长度可同步协调发育。

表 2 不同生态区玉米自交系最长苞叶长度与穗轴长度

Table 2 The longest husk length and cob length of maize inbred lines in different ecological regions

cm

生育 日数 (d) Growing days	河南 Henan						海南 Hainan					
	驻 85 Zhu 85		驻 136 Zhu 136		ZM3358		驻 85 Zhu 85		驻 136 Zhu 136		ZM3358	
	最长苞 叶长 Longest husk length	穗轴长 Cob length										
1	18.1 c	8.0 g	17.6 e	10.2 e	17.5 c	6.8 e	20.0 f	7.9 g	18.8 e	5.7 g	19.2 f	6.5 f
3	21.4 b	10.4 f	18.3 e	12.7 d	20.0 b	11.2 d	20.0 f	9.6 f	21.3 d	8.8 f	20.0 ef	7.9 e
5	22.1 b	13.8 e	18.9 de	14.9 c	20.5 b	11.8 d	21.3 e	10.2 f	21.3 d	11.0 e	21.0 de	9.3 d
7	25.7 a	18.0 d	21.8 c	19.7 b	22.9 a	15.0 c	23.4 d	14.2 e	24.0 c	15.6 d	22.0 cd	10.0 d
9	26.0 a	22.5 c	23.1 abc	22.3 a	20.7 b	17.4 b	24.6 c	16.3 d	25.2 ab	17.2 c	22.9 bc	13.9 c
11	26.9 a	26.3 ab	20.0 d	19.5 b	21.0 b	19.1 ab	24.1 cd	17.8 c	24.5 bc	20.7 b	24.0 b	15.1 e
13	27.5 a	26.6 ab	22.3 bc	21.2 ab	22.9 a	20.7 a	25.7 b	20.2 b	24.9 ab	23.1 a	26.0 a	18.2 b
15	27.4 a	27.1 a	23.8 a	22.7 a	23.3 a	19.9 a	27.0 a	25.2 a	25.7 a	23.7 a	26.0 a	19.9 a
17	27.1 a	26.1 ab	23.5 ab	22.6 a	23.0 a	20.2 a	24.6 c	24.1 a	24.9 ab	23.2 a	25.4 a	20.9 a
19	28.4 a	24.5 bc	23.5 ab	22.2 a	23.2 a	21.0 a	26.0 b	24.9 a	24.4 bc	22.9 a	25.5 a	21.0 a

注:同列数字不同小写字母表示差异达 5% 显著水平。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate a significant difference in the 5% level.

## 2.2 不同生态区玉米自交系苞叶宽度与穗轴粗同步发育动态

由图 3 可知,整体来看,不同生态区玉米自交系苞叶宽度与穗轴粗随生育进程的推进呈现波浪式渐增发育动态,其中,苞叶宽度第 7 ~ 11 天生长较快;穗轴粗度第 15 ~ 17 天急剧变宽,之后又缓慢增加。河南生态区自交系驻 85 苞叶宽度随生育进程的推进连续变宽,第 1 ~ 11 天宽度增加幅度较大,第 17 d 之后又小幅度渐增,驻 136 苞叶宽度经 1 ~ 9 d 速增期之后第 11 天开始增加变缓;ZM3358 苞叶宽度速

增期最短为 7 d,生长幅度远低于驻 85、驻 136,第 7 ~ 11 天、第 13 ~ 17 天苞叶宽度变化不大,之后略有下降。海南生态区自交系苞叶宽度变化幅度与河南生态区存在一定差异,ZM3358 苞叶宽度速增期为 13 d,比河南生态区苞叶宽度速增期延长了 6 d,第 13 天后苞叶宽度小幅度渐增;驻 85、驻 136 苞叶宽度速增期均为 9 d,苞叶变宽幅度基本一致。河南生态区穗轴粗度发育速增期持续时间较长,粗度形成时间较苞叶宽度慢,有利于穗轴在苞叶内生长。随生育进程的推进自交系驻 136 穗轴粗度第 1 ~ 17 天持

续变粗,第19天稍有下降,穗轴速增期显著大于驻85、ZM3358,穗轴粗度速增幅度ZM3358>驻136>驻85。海南生态区自交系穗轴粗度变化幅度与河南生态区存在一定差异,驻85穗轴粗度随生育进程呈直线渐增变化趋势,穗轴粗度速增期最长为19 d,

显著高于驻136、ZM3358。驻136、ZM3358穗轴粗度速增期分别为17 d、15 d,缓增期较短;驻136穗轴粗度速增期后略有降低;ZM3358穗轴粗度速增期后平稳增加,穗轴粗度速增幅度海南生态区与河南生态区一致。

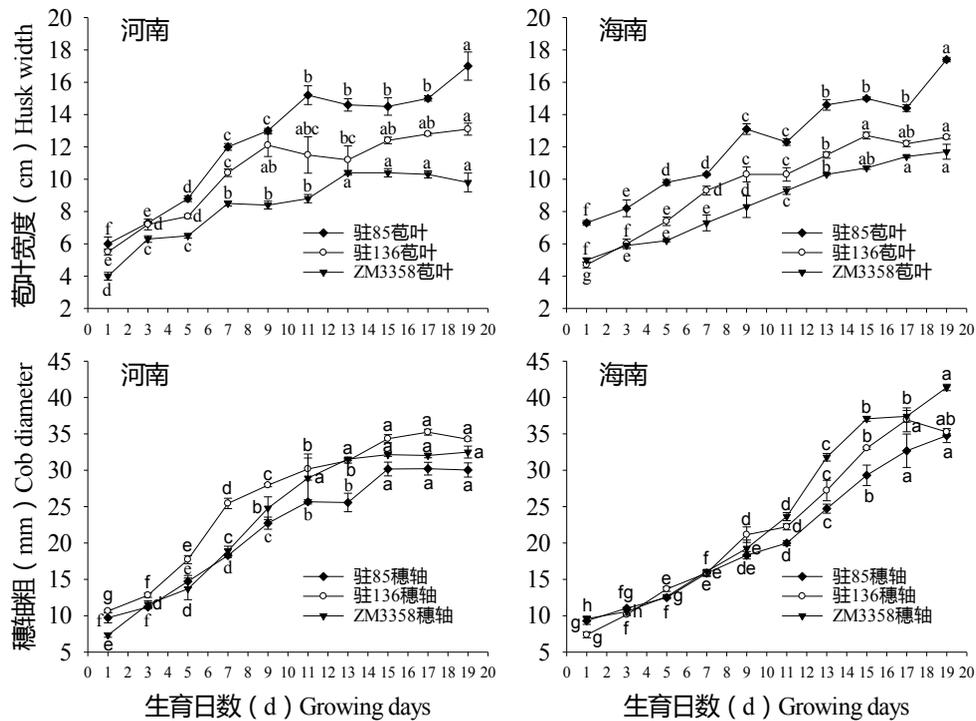


图3 不同生态区玉米自交系苞叶宽度与穗轴粗同步发育动态

Fig.3 Synchronous development dynamics of husk width and cob diameter of maize inbred lines in different ecological regions

### 2.3 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴鲜重同步发育关系及发育动态拟合

由图4可知,不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴鲜重发育动态呈“S”型生长变化曲线,历经“渐增期-速增期-缓增期”3个生育过程,整体上自交系苞叶鲜重基本呈先上升后下降的变化趋势,穗轴鲜重基本呈逐渐上升的变化趋势,河南生态区与海南生态区苞叶与穗轴鲜重变化幅度存有差异。河南生态区自交系驻85、ZM3358苞叶鲜重渐增期最短为3 d,显著低于驻136,驻85第5~11天苞叶鲜重增加较快,第13 d后缓慢增长;驻136苞叶鲜重第5~7天急剧提高,其速增期最短;ZM3358苞叶鲜重第5~9天为速增时期,之后进入渐增时期。海南生态区自交系驻85苞叶鲜重变化趋势与河南生态区一致,驻136、ZM3358苞叶鲜重变化幅度存在显著差异。海南生态区自交系驻136苞叶鲜重渐增期无显著变化,第7~13天苞叶鲜重急剧上升,之后平稳渐增,ZM3358苞叶鲜重“渐增期-速增期-缓增期”3个时期无显著差异,苞叶鲜重随生育进程呈逐渐增加趋势。河南

生态区自交系穗轴鲜重渐增持续时期显著低于海南生态区,海南生态区穗轴鲜重缓增期较短。河南生态区自交系驻85、ZM3358穗轴鲜重“渐增期-速增期-缓增期”3个时期变化一致,分别为第1~5天、第5~13天、第15~19天,驻136穗轴鲜重渐增期为3 d,显著低于驻85、ZM3358,驻136穗轴鲜重速增期显著大于驻85、ZM3358。海南生态区自交系穗轴鲜重渐增期为第1~9天,比河南生态区穗轴鲜重生长较慢,驻85、驻136、ZM3358穗轴鲜重渐增期变化基本一致,ZM3358穗轴鲜重速增期生长幅度显著高于驻85、驻136,驻85、驻136穗轴鲜重速增期生长变化幅度基本一致。

对不同生态区自交系苞叶与穗轴鲜重变化动态经Logistic拟合,建立苞叶与穗轴鲜重同步发育曲线模型,拟合方程与参数见表3。河南生态区自交系驻85、驻136、ZM3358苞叶拟合初始鲜重为14.016 9 g,拟合最终鲜重为32.3~79.0 g,半长生育日数6.3~7.6 d,苞叶鲜重生长指标Logistic拟合方程其决定系数( $R^2$ )为0.908 2~0.984 3,达显著水平( $P<0.05$ );穗轴拟合

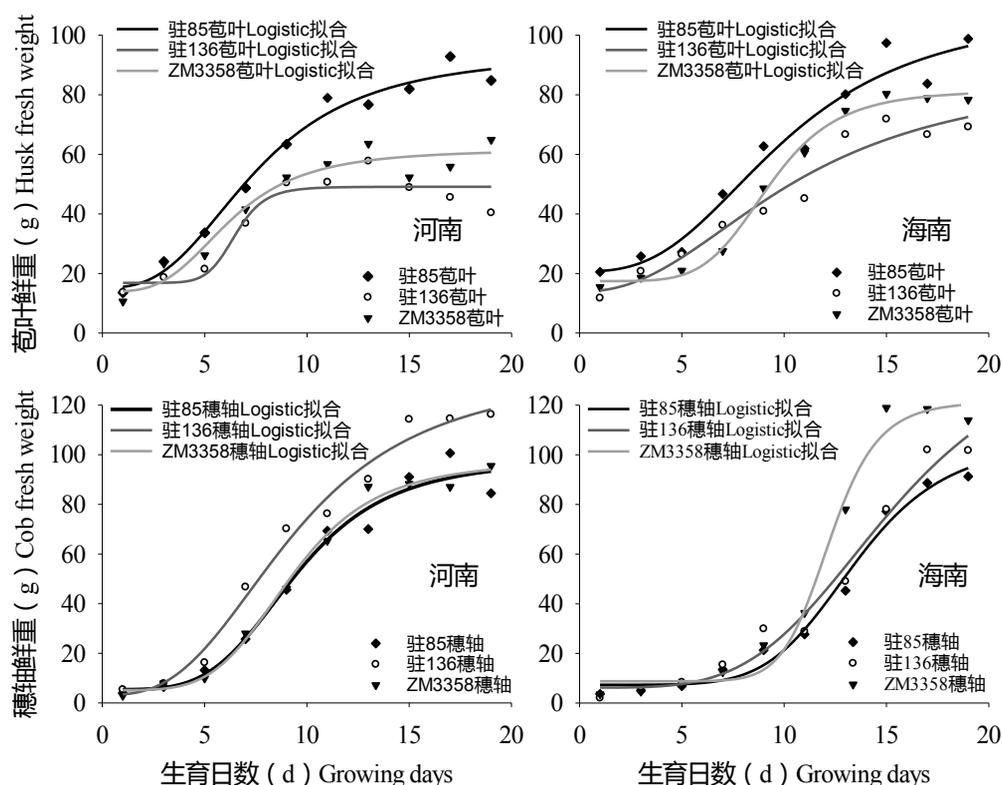


图4 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴鲜重同步发育关系及发育动态拟合

Fig.4 Synchronous development relationship and dynamic fitting of husk and cob fresh weight of maize inbred lines in different ecological regions

表3 Logistic模型拟合玉米自交系苞叶与穗轴鲜重动态发育方程

Table 3 Logistic model fitting parameters of husk and cob fresh weight of maize inbred lines dynamic development equation

自交系 Inbred line	指标 Index	河南 Henan		海南 Hainan	
		苞叶 Husk	穗轴 Cob	苞叶 Husk	穗轴 Cob
		驻85	模型方程 $y=15.27+\frac{78.95}{1+\left(\frac{x}{7.56}\right)^{-2.7937}}$	模型方程 $y=5.37+\frac{92.92}{1+\left(\frac{x}{9.48}\right)^{-4.1496}}$	模型方程 $y=20.72+\frac{88.45}{1+\left(\frac{x}{10.07}\right)^{-2.8004}}$
决定系数( $R^2$ )	0.984 3	0.975 9	0.960 6	0.985 7	
标准误差(SE)	4.319 2	6.980 4	7.183 4	5.168 7	
显著性( $\alpha$ )	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0	
驻136	模型方程 $y=16.88+\frac{32.25}{1+\left(\frac{x}{6.50}\right)^{-9.0731}}$	模型方程 $y=3.22+\frac{130.77}{1+\left(\frac{x}{9.42}\right)^{-2.8351}}$	模型方程 $y=13.96+\frac{74.14}{1+\left(\frac{x}{10.58}\right)^{-2.2690}}$	模型方程 $y=6.20+\frac{142.36}{1+\left(\frac{x}{15.22}\right)^{-4.1043}}$	
决定系数( $R^2$ )	0.908 2	0.986 6	0.954 1	0.976 5	
标准误差(SE)	5.702 3	6.283 4	5.784 9	7.315 4	
显著性( $\alpha$ )	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0	
ZM3358	模型方程 $y=13.95+\frac{47.71}{1+\left(\frac{x}{6.26}\right)^{-3.3727}}$	模型方程 $y=5.15+\frac{92.43}{1+\left(\frac{x}{9.28}\right)^{-4.4781}}$	模型方程 $y=17.16+\frac{64.08}{1+\left(\frac{x}{9.27}\right)^{-5.5600}}$	模型方程 $y=8.75+\frac{112.69}{1+\left(\frac{x}{12.21}\right)^{-10.2712}}$	
决定系数( $R^2$ )	0.944 0	0.992 6	0.994 6	0.986 2	
标准误差(SE)	5.403 1	3.947 5	2.460 6	7.213 6	
显著性( $\alpha$ )	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0	

注:显著性( $\alpha$ )在0.05显著水平下。下表同。

Note: The significance level( $\alpha$ ) is at the 0.05 significant level. The same below.

初始鲜重为 3.2~5.4 g, 拟合最终鲜重为 93.4~130.8 g, 半长生育日数 9.3~9.5 d, 穗轴鲜重生长指标 Logistic 拟合方程其决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.975 9~0.992 6, 达显著水平 ( $P<0.05$ )。海南生态区自交系驻 85、驻 136、ZM3358 苞叶鲜重拟合初始鲜重为 14.0~20.7 g, 拟合最终鲜重为 64.1~88.5 g, 半长生育日数 9.3~10.6 d, 苞叶鲜重生长指标 Logistic 拟合方程其决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.954 1~0.994 6, 达显著水平 ( $P<0.05$ ); 穗轴拟合初始鲜重为 6.2~8.8 g, 拟合最终鲜重为 98.5~142.4 g, 半长生育日数 12.2~15.2 d, 穗轴鲜重生长指标 Logistic 拟合方程其决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.976 5~0.985 7, 达显著水平 ( $P<0.05$ )。说明自交系苞叶与穗轴鲜重生长 Logistic 拟合程度较高, 其拟合方程和实际测定试验数据相关性已达显著水平, 表明通过 Logistic 方程可拟合自交系苞叶与穗轴的鲜重生长动态。

#### 2.4 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴体积同步发育关系及发育动态拟合

不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴体积同步发育动态见图 5。苞叶与穗轴体积同步发育和苞叶与穗轴鲜重变化趋势基本相同, 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴体积发育动态呈“S”型生长变化曲线, 历经“渐增期-速增期-缓增期”3个生育过程, 整体

上自交系苞叶体积基本呈先上升后下降的变化趋势, 穗轴体积基本呈逐渐上升的变化趋势, 河南生态区与海南生态区苞叶与穗轴体积变化幅度差异显著。河南生态区自交系驻 136 苞叶体积渐增期最短为 5 d, 显著低于驻 85、ZM3358, 驻 85、ZM3358 苞叶体积速增期为第 5~11 天, 显著高于驻 136, 苞叶体积迅速提高, 之后缓慢增加; 海南生态区自交系驻 136、ZM3358 苞叶体积变化趋势与河南生态区差异显著, 而驻 85 苞叶体积变化幅度基本一致, 海南生态区自交系驻 85 第 1~5 天苞叶体积逐渐增加, 第 7~13 天苞叶体积增加较快, 之后逐步渐增, 驻 85、ZM3358 苞叶体积“渐增期-速增期-缓增期”3个时期差异不显著, 苞叶体积随生育进程的推进呈直线增加趋势。河南生态区自交系穗轴体积渐增持续时期显著低于海南生态区, 海南生态区穗轴体积缓增期低于河南生态区, 河南生态区自交系驻 85、ZM3358 穗轴体积“渐增期-速增期-缓增期”3个时期变化一致, 分别为第 1~5 天、第 5~13 天、第 15~19 天, 驻 136 穗轴体积渐增期为 7 d, 显著高于驻 85、ZM3358, 驻 136 穗轴体积速增期与驻 85、ZM3358 基本一致; 海南生态区自交系穗轴体积渐增期为第 1~9 天, 比河南生态区穗轴体积发育较慢, 驻 85、驻 136、ZM3358 穗轴体积渐增期变化基本相同,

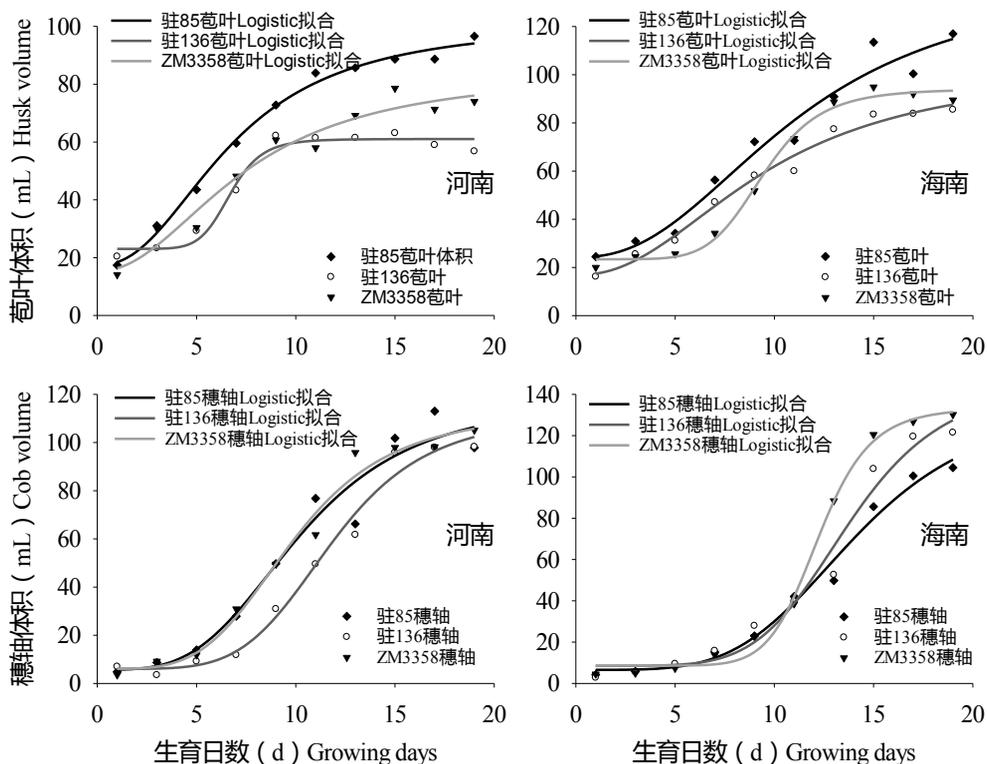


图5 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴体积同步发育关系及发育动态拟合

Fig.5 Synchronous development relationship and dynamic fitting of husk and cob volume of maize inbred lines in different ecological regions

ZM3358 穗轴体积速增期生长幅度显著高于驻 85、驻 136, 而驻 85、驻 136 穗轴体积速增期生长变化幅度差异较小。

对不同生态区自交系苞叶与穗轴体积变化动态经 Logistic 拟合, 建立苞叶与穗轴体积同步发育曲线模型, 拟合方程与参数见表 4。河南生态区自交系驻 85、驻 136、ZM3358 苞叶拟合初始体积为 15.3 ~ 23.1 mL, 拟合最终体积为 38.1 ~ 84.0 mL, 半长生育日数 6.7 ~ 7.5 d, 苞叶体积生长指标 Logistic 拟合方程其决定系数( $R^2$ )为 0.958 4 ~ 0.993 6, 达显著水平( $P < 0.05$ ); 穗轴拟合初始体积为 5.7 ~ 6.1 mL, 拟合最终体积为 105.8 ~ 112.6 mL, 半长生育日数 9.9 ~ 11.9 d, 穗轴体积生长指标 Logistic 拟合方程其决定

系数( $R^2$ )为 0.957 7 ~ 0.985 7, 达显著水平( $P < 0.05$ )。海南生态区自交系驻 85、驻 136、ZM3358 苞叶拟合初始体积为 16.9 ~ 24.2 mL, 拟合最终体积为 70.7 ~ 116.6 mL, 半长生育日数 9.5 ~ 11.2 d, 苞叶体积生长指标 Logistic 拟合方程其决定系数( $R^2$ )为 0.966 7 ~ 0.993 2, 达显著水平( $P < 0.05$ ); 穗轴拟合初始体积为 6.6 ~ 8.6 mL, 拟合最终体积为 124.8 ~ 138.3 mL, 半长生育日数 12.2 ~ 14.1 d, 穗轴体积生长指标 Logistic 拟合方程其决定系数( $R^2$ )为 0.976 7 ~ 0.995 0, 达显著水平( $P < 0.05$ )。说明自交系苞叶与穗轴体积生长 Logistic 拟合程度较高, 其拟合方程和实际测定试验数据相关关系达显著水平, 表明通过 Logistic 方程可以拟合自交系苞叶与穗轴的体积生长动态。

表 4 Logistic 模型拟合玉米自交系苞叶与穗轴体积动态发育方程

Table 4 Logistic model fitting parameters of husk and cob volume of maize inbred lines dynamic development equation

自交系 Inbred line	指 标 Index	河南 Henan		海南 Hainan	
		苞 叶 Husk	穗 轴 Cob	苞 叶 Husk	穗 轴 Cob
驻 85	模型方程	$y=17.41+\frac{84.00}{1+\left(\frac{x}{6.79}\right)^{-2.2907}}$	$y=5.71+\frac{112.55}{1+\left(\frac{x}{10.27}\right)^{-3.4788}}$	$y=24.24+\frac{116.62}{1+\left(\frac{x}{11.24}\right)^{-2.3799}}$	$y=6.56+\frac{129.82}{1+\left(\frac{x}{14.14}\right)^{-4.3627}}$
	决定系数( $R^2$ )	0.993 6	0.957 7	0.966 7	0.986 6
	标准误差(SE)	2.684 6	10.319 4	7.653 1	5.616 9
	显著性( $\alpha$ )	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0
驻 136	模型方程	$y=23.05+\frac{37.99}{1+\left(\frac{x}{6.70}\right)^{-2.4516}}$	$y=6.04+\frac{105.78}{1+\left(\frac{x}{11.87}\right)^{-4.9222}}$	$y=16.86+\frac{86.39}{1+\left(\frac{x}{9.61}\right)^{-2.2151}}$	$y=8.52+\frac{138.33}{1+\left(\frac{x}{13.78}\right)^{-5.3971}}$
	决定系数( $R^2$ )	0.975 6	0.985 3	0.985 5	0.976 7
	标准误差(SE)	3.341 6	5.918 6	3.852 8	8.901 9
	显著性( $\alpha$ )	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0
ZM3358	模型方程	$y=15.34+\frac{69.18}{1+\left(\frac{x}{7.45}\right)^{-2.1095}}$	$y=6.06+\frac{107.18}{1+\left(\frac{x}{9.90}\right)^{-3.9690}}$	$y=23.43+\frac{70.65}{1+\left(\frac{x}{9.46}\right)^{-6.6188}}$	$y=8.61+\frac{124.77}{1+\left(\frac{x}{12.24}\right)^{-9.3971}}$
	决定系数( $R^2$ )	0.958 4	0.985 7	0.993 2	0.995 0
	标准误差(SE)	5.483 5	6.008 9	3.166 6	4.707 8
	显著性( $\alpha$ )	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0

## 2.5 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴同步发育的相关性

苞叶和穗轴同步发育与雌穗发育密切相关。本试验对玉米自交系苞叶与穗轴同步发育性状之间相关关系作了进一步研究。由表 5 可知, 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴同步发育性状之间达极显著相关水平( $P < 0.01$ ), 苞叶长度与穗轴长度、苞叶宽度与穗轴粗、苞叶鲜重与穗轴鲜重、苞叶体积与穗轴体积的相关系数, 河南生态区分别为 0.848 4\*\*、0.741 0\*\*、0.729 4\*\*、0.850 9\*\*, 海南生态区分别为

0.908 8\*\*、0.750 4\*\*、0.834 6\*\*、0.862 5\*\*。苞叶长度、苞叶宽度、苞叶鲜重、苞叶体积同步发育性状之间达极显著相关关系( $P < 0.01$ ), 相关系数为 0.876 9\*\* ~ 0.995 4\*\*; 穗轴长度、穗轴宽度、穗轴鲜重、穗轴体积同步发育性状之间达极显著相关关系( $P < 0.01$ ), 相关系数为 0.805 7\*\* ~ 0.983 1\*\*。由表 6 可知, 河南生态区玉米自交系最长苞叶长度与穗轴长度的比值 LR 为 1.01 ~ 2.59, 海南生态区为 1.02 ~ 3.31, 河南生态区第 1 ~ 3 天, 比值为 1.5 ~ 3.0, 苞叶发育快穗轴发育慢, 3 d 后穗轴发育加快, 最长苞叶

长度与穗轴长度的比值接近于1:1;而海南生态区第1~9天最长苞叶长度与穗轴长度的比值为1.5~3.3,9 d后穗轴发育加快,最长苞叶长度与穗轴长度

的比值接近于1:1,由此可见,不同生态区玉米自交系苞叶长度与穗轴长度生长发育过程中可以同步协调发育。

表5 不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴同步发育的相关性

Table 5 Correlation between synchronous development of husk and cob of maize inbred lines in different ecological regions

生态区 Ecological region	苞叶与穗轴 Husk and cob	苞叶长度 Husk length	苞叶宽度 Husk width	苞叶鲜重 Husk fresh weight	苞叶体积 Husk volume	穗轴长 Cob length	穗轴粗 Cob diameter	穗轴鲜重 Cob fresh weight	穗轴体积 Cob volume
河南	苞叶长度	1.0000							
	苞叶宽度	0.9098**	1.0000						
	苞叶鲜重	0.9188**	0.8769**	1.0000					
	苞叶体积	0.9454**	0.8985**	0.9720**	1.0000				
	穗轴长度	0.8484**	0.9300**	0.8482**	0.8743**	1.0000			
	穗轴粗	0.7283**	0.7410**	0.7373**	0.8045**	0.8901**	1.0000		
	穗轴鲜重	0.7140**	0.7551**	0.7294**	0.7891**	0.8996**	0.9720**	1.0000	
	穗轴体积	0.7820**	0.7342**	0.8027**	0.8509**	0.8232**	0.8909**	0.9331**	1.0000
海南	苞叶长度	1.0000							
	苞叶宽度	0.8525**	1.0000						
	苞叶鲜重	0.9420**	0.9128**	1.0000					
	苞叶体积	0.9474**	0.9187**	0.9954**	1.0000				
	穗轴长度	0.9088**	0.8888**	0.9098**	0.9285**	1.0000			
	穗轴粗	0.8870**	0.7504**	0.8968**	0.9070**	0.8991**	1.0000		
	穗轴鲜重	0.7885**	0.6593**	0.8346**	0.8411**	0.8057**	0.9693**	1.0000	
	穗轴体积	0.7991**	0.7012**	0.8529**	0.8625**	0.8568**	0.9769**	0.9831**	1.0000

注:\*\*表示在0.01水平上极显著相关。

Note: \*\* indicates a extremely significant correlation at the 0.01 level.

表6 不同生态区玉米自交系最长苞叶长度与穗轴长度的比值(LR)

Table 6 The ratio of the longest husk length to the cob length of maize inbred lines in different ecological regions(LR)

生育日数(d) Growing days	河南 Henan			海南 Hainan		
	驻85 Zhu 85	驻136 Zhu 136	ZM3358	驻85 Zhu 85	驻136 Zhu 136	ZM3358
1	2.26 a	1.72 a	2.59 a	2.56 a	3.31 a	2.97 a
3	2.08 a	1.45 b	1.80 b	2.11 b	2.44 b	2.53 b
5	1.62 b	1.28 c	1.74 b	2.08 b	1.94 c	2.25 c
7	1.43 b	1.11 d	1.53 c	1.65 c	1.54 d	2.20 c
9	1.16 c	1.04 d	1.19 d	1.51 cd	1.47 d	1.65 d
11	1.02 c	1.02 d	1.10 d	1.36 d	1.19 e	1.59 d
13	1.03 c	1.05 d	1.11 d	1.27 de	1.08 e	1.43 e
15	1.01 c	1.05 d	1.17 d	1.07 e	1.08 e	1.31 ef
17	1.04 c	1.04 d	1.14 d	1.02 e	1.07 e	1.22 f
19	1.16 c	1.05 d	1.11 d	1.05 e	1.06 e	1.21 f

### 3 结论与讨论

苞叶作为变态叶在玉米发育代谢进程中具有光合物质高转换率的特性,其功能期长短及衰老速率

显著影响玉米子粒的产量与品质<sup>[18]</sup>。苞叶能为子粒发育确保具有合适的温度<sup>[19]</sup>,阻止害虫、鸟类危害子粒,避免或减少下雨、潮湿对子粒霉变的影响<sup>[20]</sup>。穗轴作为子粒发育的载体,其发育是否良好直接决定

子粒的正常发育,因而,苞叶与穗轴性状也应成为玉米优良自交系选育的主要指标。

苞叶与穗轴伸长经历“速增期-缓增期”2个过程,速增时期内苞叶与穗轴迅速伸长发育,是决定苞叶与穗轴伸长的关键时期,缓增时期内苞叶与穗轴伸长发育缓慢。已有研究<sup>[21]</sup>表明,吐丝期玉米自交系内部苞叶未完全发育,苞叶可包围着穗轴,授粉期自交系内部苞叶急剧伸长,穗轴长度较苞叶长度相对较短,苞叶能够充分包围穗轴;授粉之后8 d,苞叶长度可完全包裹穗轴;授粉之后13 d穗轴快速伸长,苞叶长度基本无变化;授粉之后18 d穗轴长度基本无变化,苞叶长度比穗轴相对稍短。本研究中不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴伸长基本呈“S”型曲线变化动态,苞叶与穗轴变化趋势不尽一致。河南生态区和海南生态区苞叶与穗轴变化幅度存在一定差异,河南生态区自交系苞叶与穗轴渐增期显著低于海南生态区,不同生态区不同生育时期苞叶与穗轴伸长均可保持同步<sup>[21]</sup>。本研究在河南生态区玉米自交系最长苞叶长度与穗轴长度的比值LR为1.01~2.59,海南生态区为1.02~3.31,随生育进程的发展最终最长苞叶长度与穗轴长度的比值均接近于1:1,生育后期苞叶与穗轴也可同步发育。在玉米育种实践过程中,苞叶伸长与穗轴伸长具有同步发育的对应关系,通过苞叶的发育状态可估测苞叶内部穗轴的发育状态及伸长特点。

尚赏研究发现,玉米品种、群体密度以及品种与群体密度互作均可对苞叶宽度产生极显著影响,苞叶宽度随群体密度的提高而减小。李宗泽等<sup>[22]</sup>研究表明,穗轴粗主要受环境因子与基因型共同影响,而遗传因素主要对穗轴长产生重要影响。本研究中不同生态区玉米自交系苞叶宽度与穗轴粗随生育进程的推进呈现波浪式渐增发育动态,其中苞叶宽度第7~11天生长较快,穗轴粗度第15~17天急剧变宽,之后又缓慢增加,海南生态区自交系苞叶宽度变化幅度与河南生态区存在一定差异。河南生态区比海南生态区穗轴粗度发育速增期持续时间较长,粗度形成时间较苞叶宽度慢,有利于穗轴在苞叶内生长,不同生态区不同生育时期苞叶宽度与穗轴粗度均可保持同步发育。在优良自交系选育实践过程中,苞叶宽度与穗轴粗发育的协调性决定了玉米雌穗是否正常生长发育,雌穗正常发育,苞叶从始至终可包裹着穗轴,但雌穗未能正常发育将导致苞叶宽度小,穗轴较粗,苞叶无法完全包裹穗轴,也无法有效保护内部子粒。

本研究通过Logistic回归分析,对苞叶与穗轴鲜

重生长动态进行拟合,基本呈“S”型生长变化曲线特点<sup>[21]</sup>。本研究中苞叶与穗轴鲜重发育动态历经“渐增期-速增期-缓增期”3个生育过程,整体上自交系苞叶鲜重基本呈先上升后下降的变化趋势,穗轴鲜重基本呈现逐渐上升的变化趋势。本研究也构建了苞叶与穗轴鲜重生长动态发育模型,探明苞叶与穗轴鲜重动态发育的时空特点以及苞叶与穗轴鲜重生长动态达到相关显著水平,进一步表明苞叶与穗轴鲜重发育进程中保持同步生长,可为苞叶与穗轴鲜重动态生长同步发育提供参考。本研究不同自交系在不同生态区苞叶与穗轴鲜重动态生长曲线基本一致,表明苞叶与穗轴鲜重生长动态特征是相对稳定的,因此,在模型中可为以后基于苞叶发育特征模拟预估穗轴的生长动态特征。

目前关于玉米自交系苞叶与穗轴体积相关研究鲜有报道。本研究中苞叶与穗轴体积同步发育和苞叶与穗轴鲜重变化趋势基本相同,呈“S”型生长变化曲线,整体上自交系苞叶体积基本呈先上升后下降的变化趋势,穗轴体积基本呈逐渐上升的变化趋势。河南生态区与海南生态区苞叶与穗轴体积变化幅度差异显著,自交系苞叶与穗轴体积生长Logistic拟合程度也较高,达显著相关水平,表明通过Logistic方程可以拟合自交系苞叶与穗轴体积的生长发育动态。运用Logistic方程估算苞叶与穗轴体积的生长量与实际生长发育情况吻合较好,参数的标准误相对其估计值比较小,说明估计参数的准确性也较高,可应用各参数的估计值预估玉米自交系苞叶、穗轴体积不同生育时期的发育情况。通过Logistic模型进行玉米自交系苞叶与穗轴发育进程模拟,获得不同生态区生育时期与苞叶和穗轴的相关性状后,可进一步利用玉米生育时期对其苞叶与穗轴发育特征进行预先评估。

本研究表明,苞叶和穗轴同步发育与雌穗发育密切相关,不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴同步发育性状之间达极显著相关水平( $P<0.01$ ),表明不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴可以保持同步生长发育。苞叶长度、苞叶宽度、苞叶鲜重、苞叶体积同步发育性状之间达极显著相关关系( $P<0.01$ ),穗轴长度、穗轴宽度、穗轴鲜重、穗轴体积同步发育性状之间达极显著相关关系( $P<0.01$ ),不同生态区玉米自交系苞叶与穗轴同步发育性状之间达极显著相关水平。

#### 参考文献:

- [1] RANERE A J, PIPERNO D R, HOLST I, et al. The cultural and chorological context of early Holocene maize and squash domestication in the central Balsas River Valley, Mexico[J]. Proc Natl Acad.

- Sci. U S A, 2009, 106: 5014–5018.
- [2] 尚 赏, 郭书亚, 张 艳, 等. 不同种植密度玉米苞叶性状差异及其与收获期子粒含水率的相关性研究[J]. 山东农业科学, 2022, 54(7): 53–59.  
SHANG S, GUO S Y, ZHANG Y, et al. Studies on the difference of maize husk characters with different planting densities and the correlation with grain moisture content at harvest[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(7): 53–59. (in Chinese)
- [3] 张顺风, 张桂萍, MARASINI Mukti, 等. 玉米苞叶性状与收获期子粒含水率相关性研究[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(4): 551–558, 565.  
ZHANG S F, ZHANG G P, MIARASINI M, et al. Studies on the correlation between maize husk characters and grain moisture content at harvest[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(4): 551–558, 565. (in Chinese)
- [4] HAHNEN S, JOERIS T, KREEZALER F, et al. Quantification of photosynthetic gene expression in maize C3 and C4[J]. Photosynthesis Research, 2003, 75: 183–192.
- [5] ANTONIELLI M, LUPATTELLI M, VENANZI G, et al. Some characteristics of the chlorophyllous parenchyma of maize outside the leaf lamina[J]. Plant Science Letters, 1981, 21: 107–119.
- [6] FUFITA K, EI-SHEMY H, SAKURAI N, et al. Sugar metabolism in expanding husk leaf of flint corn (*Zea mays* L.) genotypes differing in husk leaf size[J]. Plant Nutrition–Food Security and Sustainability of Agro-Ecosystems, 2001, 92: 278–279.
- [7] ROSSMAN E C. Freezing injury of maize seed[J]. Plant Physiology, 1949, 24(4): 629–656.
- [8] 徐洪文, 宋凤斌, 朱先灿, 等. 不同生育时期玉米苞叶叶绿素荧光特性差异分析[J]. 华北农学报, 2009, 24(6): 74–77.  
XU H W, SONG F B, ZHU X C, et al. Analysis on chlorophyll fluorescence of husk leaves of maize at different growing stages[J]. Acta Agricuturae Boreali-Sinica, 2009, 24(6): 74–77. (in Chinese)
- [9] 李璐璐, 明 博, 谢瑞芝, 等. 玉米品种穗部性状差异及其对子粒脱水的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1855–1867.  
LI L L, MING B, XIE R Z, et al. Differences of ear characters in maize and their effects on grain dehydration[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(10): 1855–1867. (in Chinese)
- [10] CROSS H Z, KABIR K M. Evaluation of field dry down rates in early maize[J]. Crop Science, 1989, 29(1): 54–58.
- [11] 杨献才, 陈玉香, 张学利, 等. 解剖玉米穗轴观察比较进化过程试验[J]. 种子世界, 2017(7): 25–26.  
YANG X C, CHEN Y X, ZHANG X L, et al. Experiment on observing comparative evolution process by dissecting maize cob[J]. Seed World, 2017(7): 25–26. (in Chinese)
- [12] 李树岩, 任丽伟, 刘天学, 等. 品种主要农艺性状与夏玉米机收指标相关分析[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(4): 16–21.  
LI S Y, REN L W, LIU T X, et al. Correlation analysis of agronomic characters and mechanical grain harvesting index of summer maize[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(4): 16–21. (in Chinese)
- [13] 邓 杰, 孙丽芳, 王 霞, 等. 玉米收获期子粒含水量与穗部性状的关联分析[J]. 种子, 2019, 38(10): 93–96.  
DENG J, SUN L F, WANG X, et al. Correlation analysis between grain moisture content and panicle characteristics in corn harvest[J]. Seed, 2019, 38(10): 93–96. (in Chinese)
- [14] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 等. 黄淮海地区主推夏播玉米品种种子粒脱水特性研究[J]. 中国农业科学, 2021, 54(4): 708–719.  
XU T J, LÜ T F, ZHAO J R, et al. The grain dehydration characteristics of the main summer maize varieties in Huang-Huai-Hai region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(4): 708–719. (in Chinese)
- [15] 刘文童, 监立强, 郭晋杰, 等. 玉米穗部性状及其一般配合力的关联分析[J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(3): 706–715.  
LIU W T, JIAN L Q, GUO J J, et al. Association analysis of ear-related traits and their general combining ability in maize[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(3): 706–715. (in Chinese)
- [16] 王志伟, 程丽丽, 吴 菲, 等. 夏玉米花丝与穗轴伸长动态特征研究[J]. 玉米科学, 2021, 29(6): 76–82.  
WANG Z W, CHENG L L, WU F, et al. Study on dynamic characteristics of silk and female cob extension in summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 21(3): 706–715. (in Chinese)
- [17] 许海涛, 冯晓曦, 许 波, 等. 热带生态区玉米自交系雄穗生育特性研究[J]. 山东农业科学, 2022, 54(8): 54–61.  
XU H T, FENG X X, XU B, et al. Study on tassel growth characteristics of maize inbred lines in tropical ecological area[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(8): 54–61. (in Chinese)
- [18] 徐洪文, 宋凤斌, 童淑媛, 等. 两种基因型玉米苞叶的衰老生理特性[J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(3): 28–32.  
XU H W, SONG F B, TONG S Y, et al. Senescence physiological characteristics of husk of two maize genotypes[J]. Journal of Plant Resource and Environment, 2008, 17(3): 28–32. (in Chinese)
- [19] QUATTER S, JONES R J, CROOKSTON R K. Effect of water deficit during grain filling on the pattern of maize kernel growth and development[J]. Crop Science, 1987, 27(4): 726–730.
- [20] 霍仕平, 晏庆九, 许明陆, 等. 玉米果穗苞叶性状的遗传分析[J]. 杂粮作物, 2000, 20(2): 8–12.  
HUO S P, YAN Q J, XU M L, et al. Genetic analysis of ear bract characters in maize[J]. Rain Fed Crops, 2000, 20(2): 8–12. (in Chinese)
- [21] 孟剑霞. 玉米果穗发育特性研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2005.
- [22] 李宗泽, 徐晓明, 孙 强, 等. 玉米穗轴长与穗轴粗的 QTL 定位及全基因组预测[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 44–52.  
LI Z Z, XU X M, SUN Q, et al. QTL mapping and genomic selection of cob length and diameter in maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(4): 44–52. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)