

# 芝麻干物质积累与分配对盛花期渍水响应的 定量化分析

陈丹丹<sup>1,2</sup>,李国强<sup>1,2,3\*</sup>,周 萌<sup>1,2</sup>,张建涛<sup>1,2</sup>,胡 峰<sup>1,2,3</sup>,李亚丽<sup>1,2</sup>,郑国清<sup>1,2,3</sup>  
(1.河南省农业科学院 农业经济与信息研究所,河南 郑州 450002; 2.河南省智慧农业工程技术研究中心,河南 郑州 450002; 3.农作物种植监测与预警河南省工程实验室,河南 郑州 450002)

**摘要:**为定量化描述渍水条件下芝麻的干物质积累与分配规律,以耐渍品种中芝 13 和渍水敏感品种郑芝 13 为研究对象,通过盆栽试验,研究了盛花期持续渍水不同时间[0 h(CK)、24 h(W24h)、36 h(W36h)、48 h(W48h)、60 h(W60h)]对芝麻干物质积累与分配的影响,以苗后相对天数为度量单位,对芝麻干物质积累与分配进行定量化分析。结果表明:芝麻干物质积累、蒴果分配指数随苗后天数的变化趋势均符合 Logistic 曲线变化规律,拟合决定系数分别在 0.96、0.91 以上。干物质积累拟合 Logistic 方程中两品种参数  $K$  值随渍水持续时间延长而减小,中芝 13 参数  $a$ 、 $b$  受渍水影响不大,郑芝 13 参数  $a$ 、 $b$  除 W24h 处理外其余各处理较 CK 显著降低。通过分析次级参数可知,渍水降低了 2 个芝麻品种的干物质积累速率,随着渍水持续时间的延长,降低幅度增大。两品种蒴果分配指数拟合 Logistic 方程中参数  $K$  值随着渍水时间延长而逐渐降低,其中郑芝 13 渍水 36、48、60 h 较 CK 显著降低;参数  $a$ 、 $b$  则不受渍水处理影响。芝麻茎分配指数呈先升后降的单峰曲线,可用四次多项式拟合,各处理拟合决定系数在 0.83 以上。叶分配指数呈递减曲线,可用二次多项式进行拟合,各处理拟合决定系数均在 0.91 以上。渍水对芝麻茎、叶分配指数的拟合参数没有显著影响。

**关键词:** 芝麻; 盛花期; 渍水; 干物质积累与分配; 定量化

**中图分类号:** S565.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-3268(2018)01-0018-08

## Quantitative Analysis of Dry Matter Accumulation and Distribution in Sesame during Flowering Period under Waterlogging Stress

CHEN Dandan<sup>1,2</sup>, LI Guoqiang<sup>1,2,3\*</sup>, ZHOU Meng<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiantao<sup>1,2</sup>,  
HU Feng<sup>1,2,3</sup>, LI Yali<sup>1,2</sup>, ZHENG Guoqing<sup>1,2,3</sup>

(1. Agricultural Economy & Information Research Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Research Center for Smart Agriculture Engineering and Technology of Henan Province, Zhengzhou 450002, China; 3. Engineering Laboratory for Crop Monitoring and Early Warning of Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to reveal the effect of waterlogging stress on dry matter accumulation and distribution of sesame, waterlogging resistant variety Zhongzhi 13 and waterlogging sensitive variety Zhengzhi 13 as research objects were used to study dry matter accumulation and distribution in sesame with different waterlogging duration (waterlogging 0 h, 24 h, 36 h, 48 h, 60 h) during full flowering period through pot experiments. Quantitative analysis was carried out on the dry matter accumulation and distribution in sesame with the relative number of days after emergence as the unit of measure. The results showed that

收稿日期:2017-08-02  
基金项目:国家自然科学基金项目(31301239)  
作者简介:陈丹丹(1987-),女,河南尉氏人,助理研究员,硕士,主要从事作物模型模拟研究。E-mail:1095279667@qq.com  
\* 通讯作者:李国强(1984-),男,河南林州人,副研究员,博士,主要从事作物系统模拟研究。E-mail:guoqiangli@yemail.com

variation tendency of sesame dry matter accumulation along with the change of days after emergence and sesame capsule distribution index along with the change of days after anthesis accorded with the Logistic curve change rule, fitting decisive factors above 0.96 and 0.91, respectively. The fitting parameter  $K$  of dry matter accumulation decreased with the increase of the duration of waterlogging stress, Zhongzhi 13 parameters  $a$  and  $b$  were affected little by waterlogging stress. Zhengzhi 13 parameters  $a$  and  $b$  were significantly lower than the control except for W24h (waterlogging 24 h) experiment. By analyzing the secondary parameters, it could be known that the dry matter accumulation rate of the two sesame varieties were decreased, and the decreasing amplitude increased with the increase of the duration of the waterlogging stress. The capsule distribution index Logistic curve fitting parameter  $K$  of two varieties with waterlogging time growth decreased gradually, in which Zhengzhi 13 at 36 h, 48 h, 60 h after waterlogging significantly reduced. Waterlogging had no significant effect on the sesame capsule distribution index  $a$  and  $b$ . The distribution index of sesame stem first increased and then decreased, and the single peak curve was fitted with four degree polynomial, and the fitting coefficient was over 0.83. The leaf distribution index showed a decreasing curve, which fit the two degree polynomial, and the decision coefficient of each treatment was more than 0.91. Moisture damage had no significant effect on the fitting parameters of sesame stem and leaf distribution index.

**Key words:** Sesame; Full flowering period; Waterlogging stress; Dry matter accumulation and distribution; Quantification

芝麻是抗湿性极弱的作物,其生育期正处于多雨季节,常因渍涝灾害减产甚至绝收<sup>[1-2]</sup>。芝麻产量形成过程实质上是干物质积累与分配的过程<sup>[3]</sup>,而同化物的积累量及其向经济部位分配的比例决定作物产量的高低<sup>[4]</sup>。盛花期是芝麻营养生长和生殖生长并进时期<sup>[5]</sup>,是决定芝麻植株蒴数和蒴粒数的关键阶段,也是芝麻对渍涝最为敏感的时期<sup>[6]</sup>。因此,开展盛花期渍水条件下芝麻干物质积累与分配的研究十分必要。

目前,对于作物干物质积累动态的模拟研究较多,形成了干物质积累量随时间或生长度日 (Growing degree days, GDDs) 等变化的 Logistic、Richards、Gompertz 等 S 形曲线模型<sup>[7]</sup>,其中使用较多的是 Logistic 方程与 Richards 方程。对于干物质分配的模拟研究也较多,由于不同作物的干物质分配指数动态差异较大,所以模拟所用方程也比较多样化。陈亚楠<sup>[8]</sup>用三角函数模拟了丹参各器官的分配指数动态;李国强等<sup>[9]</sup>用蒸汽压力模型 (Vapor pressure model, VP) 拟合了小麦地上部干物质在不同器官中的分配动态;周静<sup>[10]</sup>分别用多项式、指数函数模拟了温室黄瓜的叶、茎与果实的分配动态。对于芝麻干物质积累与分配的研究主要涉及芝麻干物质积累规律<sup>[11]</sup>,以及不同种植密度<sup>[12]</sup>、栽培条件<sup>[13]</sup>、栽培方式<sup>[14]</sup>、施肥水平<sup>[15-16]</sup>等对芝麻干物质积累与分配的影响。基于渍水条件下开展的芝麻研究则主要侧重于芝麻耐渍品种和基因型的筛选<sup>[6,17-18]</sup>以及从根系抗氧化酶活性<sup>[19]</sup>、解剖结构<sup>[20]</sup>、叶片和茎尖

内源激素<sup>[21]</sup>等方面探究芝麻耐渍机制。而对于渍水条件下芝麻干物质积累与分配的定量化描述很少,周萌等<sup>[22]</sup>的研究阐明了芝麻渍水条件下干物质积累与分配对产量的影响,但未对渍水条件下芝麻干物质的分配指数进行深入研究。故在此基础上,选择耐渍品种中芝 13<sup>[17]</sup>和渍水敏感品种郑芝 13,将渍水时间延长至 60 h,主要侧重于定量化分析渍水条件下芝麻茎、叶、蒴果之间的干物质分配指数,并对其进行曲线拟合,探究渍水条件下芝麻地上部干物质积累与分配规律,量化渍水条件下芝麻茎、叶、蒴果之间的干物质分配关系,为芝麻栽培管理以及机制型湿害模型的建立提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验设计

试验于 2014—2015 年在河南省农业科学院现代农业科技试验示范基地 (E113°41', N35°00') 进行。以耐渍品种中芝 13 和渍水敏感品种郑芝 13 为试验材料,采用盆栽方式 (盆口内径 30 cm, 高 40 cm), 选用高产田耕层土壤, 土质为砂壤土, 自然风干过筛后与肥料充分混匀。每盆装土 15 kg, 风干土 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 0.15 g/kg、0.10 g/kg、0.15 g/kg。试验时,为了最大可能接近大田环境,同时方便后期渍水处理,在大田中挖 5 个大坑,坑中铺塑料布,每个坑为 1 个主区,设渍水 0、24、36、48、60 h,分别表示为 CK、W24h、W36h、W48h、W60h,将试验盆装土后放入坑中;每个坑分为 2 个副区,分别

播种中芝 13 与郑芝 13。每个处理种植 30 盆,每盆定苗 3 株。在盛花期(出苗后 46~49 d)进行渍水处理,水层保持 1~2 cm,到达渍水时间后将盆钵移出。试验期间,在试验地上方架起防虫网以防虫害。整个试验进行中,光照、温度、空气成分、流通状态及其他管理措施与大田完全相同。

从出苗后第 15 天开始,每 4~6 d 采集一次地上部植株,每个处理取 3 株长势一致的芝麻植株,分别按叶片、茎和蒴果进行分样,于 105 ℃ 杀青 30 min 后,80 ℃ 下烘干至恒质量,常温下称其干质量。

1.2 数据处理及验证

对 2014 年的干质量测量值和对应的苗后天数分别进行归一化处理,将最大干质量和出苗至成熟天数分别定为 1,相对干质量及相对时间的取值为 0~1,用 DPS 进行 Logistic 方程模拟。分别对叶片分配指数、茎分配指数与对应的苗后天数,以及蒴果分配指数与花后天数进行归一化处理。用 Sigma-Plot 10.0 绘图。

本试验中用分配指数来描述芝麻干物质在不同器官中的分配。分配指数是指植株某一部分干质量占整株干质量的比例,是一个相对的量,无量纲<sup>[23]</sup>。在同化物分配研究中,通常首先研究同化物在地上部与地下部之间的分配情况,然后以地上部分配量为基础,再进一步研究其向叶片、茎和蒴果中的分配。本试验仅对芝麻地上部各器官的分配进行研究,地上部各器官的分配指数计算如下:

$$PIL = WL/W,$$
$$PIS = WS/W,$$
$$PIF = WF/W.$$

式中, $PIL$ 、 $PIS$ 、 $PIF$  分别表示芝麻叶片、茎、蒴果的分配指数, $W$  表示芝麻植株地上部总干质量, $WL$ 、 $WS$ 、 $WF$  分别表叶片、茎、蒴果的干质量。由于芝麻生长后期老叶逐渐脱落, $WL$  包括脱落叶片的质量。

采用 2015 年相同处理的试验数据检验拟合参

数,比较实测值与拟合值,计算根均方差( $RMSE$ )、归一化均方根差( $NRMSE$ )和决定系数( $R^2$ ),并绘制实测值与拟合值的 1:1 关系图。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - R_i)^2}{n}}$$
$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{R}} \times 100\%$$

$S_i$  为拟合值, $R_i$  为实测值, $\bar{R}$  为实测值平均值, $n$  为样本容量。一般认为, $NRMSE < 10\%$  为拟合准确度极好, $10\% \leq NRMSE \leq 20\%$  为拟合准确度好, $20\% < NRMSE \leq 30\%$  为拟合准确度中等, $NRMSE > 30\%$  为拟合准确度差<sup>[24]</sup>。

2 结果与分析

2.1 不同耐湿性芝麻品种地上部干物质积累对盛花期渍水响应的定量化分析

2.1.1 渍水对芝麻干物质积累的影响 由图 1 可以看出,芝麻苗期干物质增长缓慢,进入花期(苗后 42 d)后干物质迅速增长,花期结束(苗后 62 d)后,干质量增长速率减慢。干物质积累动态总体呈慢—快—慢的 S 形曲线。在盛花期渍水处理之前,2 个品种各处理单株地上部干质量与 CK 间差别并不明显;渍水处理后,不同芝麻品种表现不同,中芝 13 干物质积累量与 CK 差异不大;而郑芝 13 随着生育期的推进,不同处理与 CK 间的干物质积累量差异逐渐增大,渍水处理使其干物质积累量降低,表现为  $CK > W24h > W36h > W60h > W48h$ ,以 W48h 处理降幅最大,盛花期 W24h、W36h、W48h、W60h 处理单株地上部干质量较 CK 分别降低 17.9%、26.6%、39.7%、31.9%,成熟期(苗后 83 d) W24h、W36h、W48h、W60h 处理单株地上部干质量较 CK 分别降低 17.3%、21.4%、36.9%、36.2%。两品种受渍害程度相比,郑芝 13 大于中芝 13。

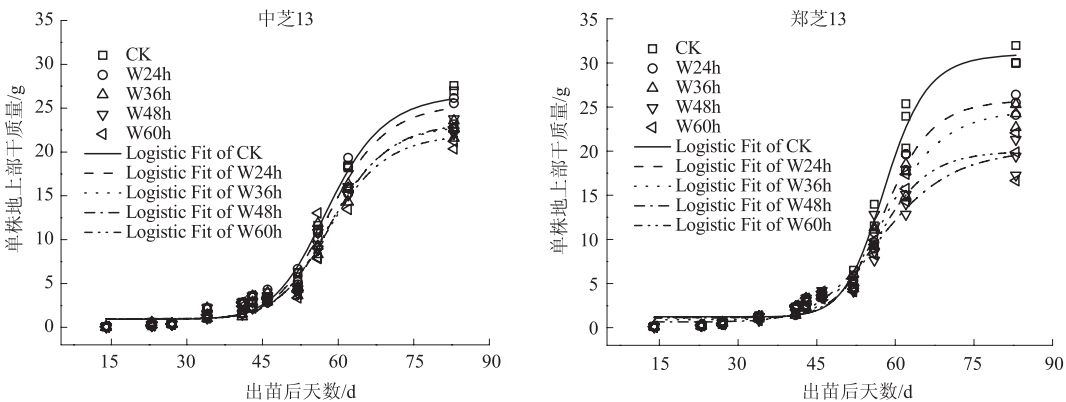


图 1 盛花期不同渍水时间处理不同耐湿性芝麻品种的干物质积累动态及其拟合曲线

2.1.2 渍水条件下芝麻地上部同化物积累的动态拟合及参数分析 采用 Logistic 方程  $Y = K/(1 + ae^{-bx})$  ( $Y$  为干物质积累量,  $K$  为理论最大积累量,  $x$  为生长天数,  $a$ 、 $b$  为参数) 对不同渍水处理下芝麻地上部相对干质量与相应苗后天数的关系进行拟合, 参数见表 1。由表 1 可见, 各处理拟合决定系数均在 0.96 以上, 经  $F$  检验, 模型的拟合效果达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。这表明采用 Logistic 模型可以描述芝麻的干物质积累动态。渍水处理影响模型参

数, 与 CK 相比, 不同渍水时间处理两品种的  $K$  值均有不同程度降低, 且郑芝 13 的降低幅度大于中芝 13, 表明渍水降低了芝麻干物质积累。两品种的参数  $a$  总体上也表现为随渍水时间延长而降低, 参数  $b$  除 W60h 处理外其余各处理表现为随渍水时间延长而逐渐升高。经方差分析可知, 中芝 13 渍水 36 h 后,  $K$  值相比于 CK 显著降低, 而  $a$ 、 $b$  受渍水影响不大; 郑芝 13 各渍水处理  $K$  值相比于 CK 均显著降低, 渍水 36 h 后, 参数  $a$ 、 $b$  相比于 CK 也呈显著变化。

表 1 不同渍水处理下芝麻地上部相对干物质积累 Logistic 方程参数

品种	处理	参数			$R^2$	$P$
		$K$	$a$	$b$		
中芝 13	CK	0.963 ± 0.023a	9.477 ± 0.548a	-13.601 ± 0.847a	0.986	0.000 1
	W24h	0.923 ± 0.027ab	9.399 ± 0.659a	-13.410 ± 1.015a	0.980	0.000 1
	W36h	0.844 ± 0.027bc	9.210 ± 0.686a	-13.095 ± 1.058a	0.977	0.000 1
	W48h	0.854 ± 0.026bc	8.902 ± 0.619a	-12.591 ± 0.958a	0.980	0.000 1
	W60h	0.806 ± 0.033c	8.837 ± 0.821a	-12.601 ± 1.279a	0.963	0.000 1
郑芝 13	CK	0.977 ± 0.026a	12.078 ± 0.887a	-17.328 ± 1.331a	0.981	0.000 1
	W24h	0.813 ± 0.022b	10.539 ± 0.707ab	-15.120 ± 1.075ab	0.983	0.000 1
	W36h	0.773 ± 0.022b	9.474 ± 0.630b	-13.568 ± 0.972b	0.982	0.000 1
	W48h	0.625 ± 0.025c	8.288 ± 0.716b	-12.059 ± 1.145b	0.966	0.000 1
	W60h	0.634 ± 0.025c	9.346 ± 0.868b	-13.714 ± 1.366b	0.963	0.000 1

注:  $K$  为相对干物质积累量最大模拟值,  $a$ 、 $b$  为模型参数; 同列不同小写字母表示在 5% 水平差异显著。

本研究中, 盛花期渍水的相对时间在 0.554 ~ 0.590。由表 2 可见, 两品种干物质增长速率达到最大的时间  $T_{\max}$  均在渍水处理之后。  $T_{\max}$  受渍水影响不明显,  $V_{\max}$  均随渍水持续时间延长而下降。与 CK

的  $V_{\max}$  相比, 中芝 13 各渍水处理降低不显著, 郑芝 13 各渍水处理均显著降低。说明渍水对芝麻干物质积累速率达到最大值的时间没有影响, 但降低了芝麻干物质积累的最大速率。

表 2 不同渍水处理下芝麻地上部相对干物质积累的特征参数

参数	中芝 13					郑芝 13				
	CK	W24h	W36h	W48h	W60h	CK	W24h	W36h	W48h	W60h
$T_{\max}$	0.697a	0.701a	0.703a	0.707a	0.701a	0.697a	0.697a	0.698a	0.687a	0.682a
$V_{\max}$	3.274a	3.104a	2.762a	2.689a	2.539a	4.231a	3.074b	2.623bc	1.884c	2.172bc
$T$	1.035a	1.044a	1.054a	1.072a	1.066a	0.962b	1.001ab	1.037ab	1.068a	1.017ab
$T_1$	0.600a	0.603a	0.603a	0.602a	0.597a	0.621a	0.610ab	0.601b	0.578c	0.585bc
$T_2$	0.194a	0.196a	0.201a	0.209a	0.209a	0.152b	0.174b	0.194ab	0.218a	0.192ab
$T_3$	0.241a	0.244a	0.250a	0.260a	0.260a	0.189b	0.217b	0.242ab	0.272a	0.239ab
$V_1$	0.339a	0.325ab	0.296c	0.300bc	0.285c	0.332a	0.282b	0.272b	0.228c	0.229c
$V_2$	1.148a	1.096ab	0.993bc	0.996bc	0.947c	1.196a	0.982b	0.920b	0.742c	0.771c
$V_3$	0.206a	0.196ab	0.177b	0.176b	0.167b	0.225a	0.180b	0.165b	0.130c	0.138c
$W_1$	0.204a	0.196ab	0.178bc	0.180bc	0.170c	0.206a	0.172b	0.163b	0.132c	0.134c
$W_2$	0.911a	0.876ab	0.798bc	0.808bc	0.763c	0.924a	0.770b	0.732b	0.591c	0.600c
$W_3$	0.213a	0.205ab	0.187bc	0.189bc	0.178c	0.216a	0.180b	0.171b	0.138c	0.140c

注:  $T_{\max}$  为干物质增长速率最大时的相对时间,  $V_{\max}$  为干物质增长最大相对速率,  $T$  为干物质增长相对持续时间,  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  分别为干物质渐增期、快增期、缓增期的相对持续时间,  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  分别为干物质渐增期、快增期、缓增期的相对增长速率,  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  分别为干物质渐增期、快增期、缓增期的相对增长量; 同行不同小写字母表示在 5% 水平差异显著。

中芝 13 各渍水处理的  $T$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  与 CK 差异不大。  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  总体表现为随着渍水持续时间增长而减小, 渍水持续时间达 36 h 后, 各处理参数与 CK 差异显著。说明渍水对中芝 13 进入各生育时期的时间即生育期发育没有影响, 但降

低了其干物质积累速率, 从而降低了最终的干物质积累量。郑芝 13 各渍水处理的  $T$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  较 CK 稍有升高, 但除 W48h 处理之外, 其余渍水处理与 CK 差异不显著。  $T_1$  总体表现为随着渍水持续时间延长而减小, 其中 W48h、W60h 处理与 CK 差异显著,

说明渍水使干物质积累渐增期缩短,快增期提前到来。 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  总体表现为随着渍水持续时间延长而减小,各渍水处理均与 CK 差异显著。说明渍水降低了郑芝 13 的干物质积累速率,从而降低了其干物质积累量。

2.2 不同耐湿性芝麻品种地上部干物质分配对盛花期渍水响应的定量分析

2.2.1 渍水对地上部同化物分配的影响 由图 2 可以看出,在芝麻苗期,干物质主要在茎、叶中分配,随着植株生长,叶分配指数逐渐下降,茎分配指数逐渐上升。进入花期后,蒴果出现,大量干物质开始运往蒴果,因此,茎分配指数开始下降,蒴果分配指数不断上升。总体来看,茎分配指数呈现先升后降的单峰曲线,叶分配指数呈递减曲线,蒴果分配指数呈递增曲线。

盛花期渍水处理(苗后 46 ~ 49 d)后,芝麻茎干物质分配指数较 CK 升高,其中苗后 62 d,两品种渍水处理 W36h、W48h、W60h 较 CK 均显著升高( $P < 0.05$ ),且中芝 13 渍水处理 W36h、W48h 与 CK 差异达到极显著水平( $P < 0.01$ );苗后 83 d,郑芝 13 W36h、W48h、W60h 处理较 CK 显著升高( $P < 0.05$ ),而中芝 13 差异不显著。渍水处理对两品种的叶分配指数没有显著影响。

渍水处理蒴果分配指数较 CK 下降,并且随着渍水持续时间的延长,下降幅度增大。苗后 52 ~ 56 d,中芝 13 渍水处理 W60h 与 CK 差异显著( $P < 0.05$ );苗后 62 d,两品种渍水处理 W36h、W48h、W60h 与 CK 差异极显著( $P < 0.01$ );苗后 83 d,郑芝 13 渍水处理 W36h、W48h、W60h 较 CK 显著降低( $P < 0.05$ ),而中芝 13 各渍水处理与 CK 差异不显著。

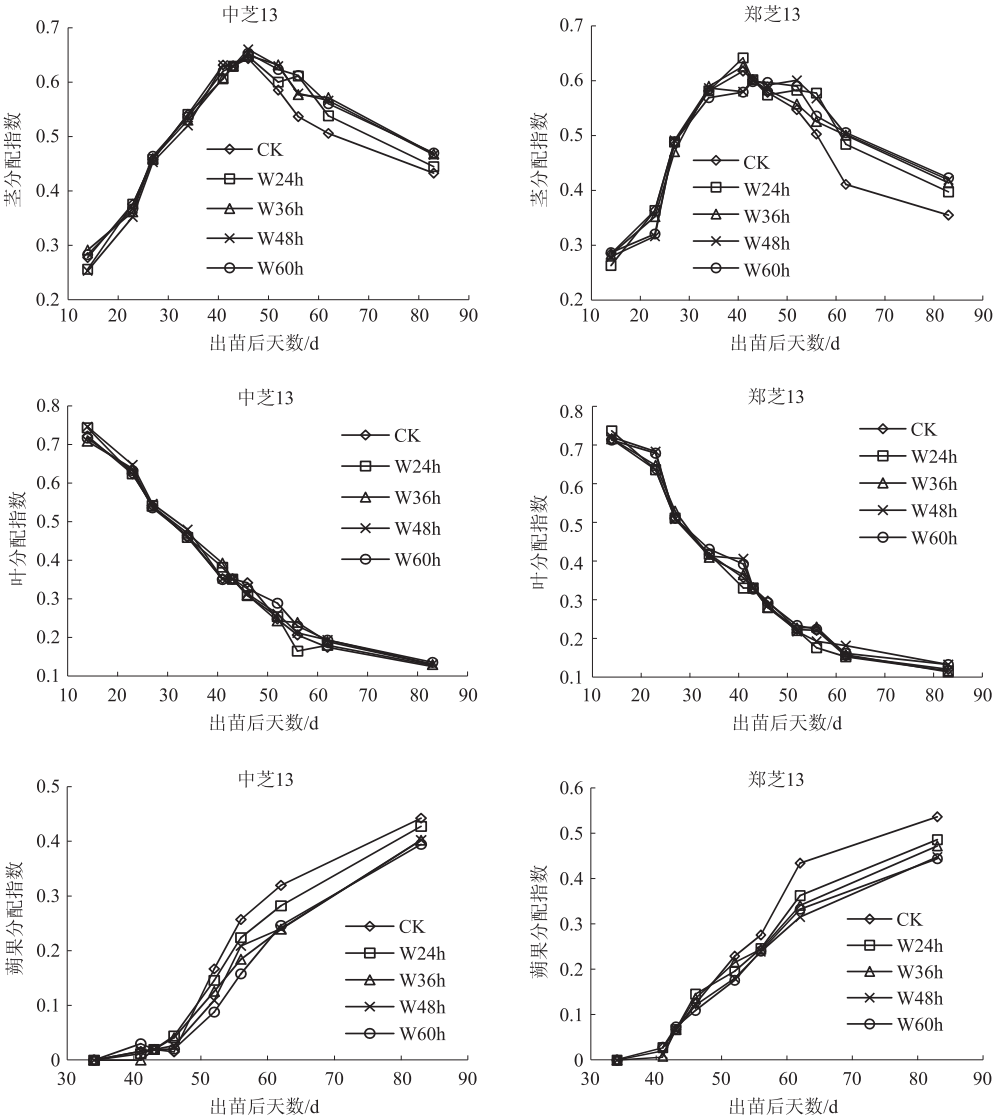


图 2 盛花期不同渍水时间处理不同耐湿性芝麻品种地上部各器官的相对干物质分配指数

综上所述,渍水处理对芝麻地上部干物质分配的影响主要体现在增大茎的分配指数,降低蒴果的

分配指数。从苗后 83 d 地上部同化物分配指数来看,中芝 13 渍水后恢复能力强于郑芝 13。

2.2.2 渍水条件下芝麻地上部干物质分配的动态拟合及参数分析 对芝麻茎分配指数与对应出苗后天数归一化结果进行曲线拟合。在所选的多种拟合结果中,四次多项式拟合效果最好,用公式描述如下:

$$pis = c_0 + c_1t + c_2t^2 + c_3t^3 + c_4t^4 \tag{1}$$

式中,*pis* 为相对茎分配指数,*t* 为苗后相对天

数,*c*<sub>0</sub>、*c*<sub>1</sub>、*c*<sub>2</sub>、*c*<sub>3</sub>、*c*<sub>4</sub> 为多项式拟合参数。

不同处理的四次多项式拟合参数如表 3。由表 3 可见,各处理拟合决定系数都在 0.83 以上,经 *F* 检验,模型拟合效果达到极显著水平 (*P* < 0.01)。表明采用四次多项式可以描述芝麻茎分配指数随时间的变化动态。经方差分析可知,两品种各处理间的参数没有明显差别,说明渍水对芝麻茎分配指数的四次多项式拟合参数没有显著影响。

表 3 不同渍水处理下芝麻相对茎分配指数的四次多项式参数

品种	处理	参数					<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>P</i>
		<i>c</i> <sub>0</sub>	<i>c</i> <sub>1</sub>	<i>c</i> <sub>2</sub>	<i>c</i> <sub>3</sub>	<i>c</i> <sub>4</sub>		
中芝 13	CK	0.680a	-5.269a	26.686a	-40.622a	19.109a	0.927	0.000 1
	W24h	0.435a	-2.867a	18.274a	-28.603a	13.360a	0.928	0.000 1
	W36h	0.589a	-4.059a	21.221a	-31.494a	14.374a	0.856	0.000 1
	W48h	0.594a	-4.602a	23.873a	-35.551a	16.315a	0.944	0.000 1
	W60h	0.573a	-3.980a	21.276a	-31.809a	14.573a	0.893	0.000 1
郑芝 13	CK	0.577a	-4.279a	24.930a	-40.432a	19.681a	0.894	0.000 1
	W24h	0.293a	-1.536a	15.519a	-27.052a	13.333a	0.905	0.000 1
	W36h	0.448a	-2.824a	19.167a	-31.548a	15.337a	0.886	0.000 1
	W48h	0.516a	-3.486a	20.659a	-32.402a	15.301a	0.831	0.000 1
	W60h	0.567a	-3.838a	21.516a	-33.433a	15.782a	0.857	0.000 1

注: *c*<sub>0</sub>、*c*<sub>1</sub>、*c*<sub>2</sub>、*c*<sub>3</sub>、*c*<sub>4</sub> 为多项式拟合参数;同列不同小写字母表示差异达到 5% 水平。下同。

对芝麻叶分配指数与对应出苗后天数归一化结果进行曲线拟合。在所选的多种拟合结果中,二次多项式拟合效果最好,用公式表示如下:

$$pil = c_1 + c_2t + c_3t^2 \tag{2}$$

式中,*pil* 为相对叶分配指数,*t* 为苗后相对天数,*c*<sub>1</sub>、*c*<sub>2</sub>、*c*<sub>3</sub> 为多项式拟合参数。

由表 4 可见,各处理拟合决定系数都在 0.91 以上,经 *F* 显著性检验,模型拟合效果达到极显著水平 (*P* < 0.01)。这表明,采用二次多项式可以描述芝麻叶分配指数的变化动态。经方差分析可知,两品种各处理间的参数没有明显差别,说明渍水对芝麻叶分配指数的拟合参数没有显著影响。

表 4 不同渍水处理下芝麻相对叶分配指数的二次多项式参数

品种	处理	参数			<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>P</i>
		<i>c</i> <sub>1</sub>	<i>c</i> <sub>2</sub>	<i>c</i> <sub>3</sub>		
中芝 13	CK	1.210 ± 0.036a	-2.040 ± 0.134a	0.965 ± 0.113a	0.969	0.000 1
	W24h	1.257 ± 0.037a	-2.208 ± 0.138a	1.088 ± 0.117a	0.970	0.000 1
	W36h	1.190 ± 0.061a	-1.950 ± 0.225a	0.903 ± 0.191a	0.917	0.000 1
	W48h	1.261 ± 0.030a	-2.188 ± 0.113a	1.077 ± 0.096a	0.979	0.000 1
	W60h	1.187 ± 0.052a	-1.954 ± 0.191a	0.922 ± 0.162a	0.934	0.000 1
郑芝 13	CK	1.354 ± 0.037a	-2.401 ± 0.136a	1.197 ± 0.116a	0.974	0.000 1
	W24h	1.416 ± 0.040a	-2.649 ± 0.148a	1.380 ± 0.126a	0.972	0.000 1
	W36h	1.365 ± 0.042a	-2.413 ± 0.155a	1.193 ± 0.132a	0.968	0.000 1
	W48h	1.340 ± 0.055a	-2.524 ± 0.205a	1.290 ± 0.174a	0.945	0.000 1
	W60h	1.377 ± 0.050a	-2.425 ± 0.185a	1.211 ± 0.158a	0.954	0.000 1

注: *c*<sub>1</sub>、*c*<sub>2</sub>、*c*<sub>3</sub> 为多项式拟合参数。

对芝麻蒴果分配指数与对应出苗后天数归一化结果进行曲线拟合。在所选的多种拟合结果中,Logistic 方程拟合效果最好,拟合参数见表 5。由表 5 可见,各处理拟合决定系数都在 0.91 以上,经 *F* 检验,模型的拟合效果达到极显著水平 (*P* < 0.01)。表明采用 Logistic 模型可以描述芝麻蒴果分配指数

的变化动态。渍水处理影响模型参数,随着渍水时间延长,两品种的 *K* 值均逐渐降低,表明盛花期渍水降低芝麻的蒴果分配指数。经方差分析可知,郑芝 13 渍水 36 h 后,*K* 值与 CK 差异显著;而中芝 13 渍水处理的 *K* 值降低不显著。两品种各处理间的参数 *a*、*b* 差异均不显著。

表 5 不同渍水处理下芝麻相对蒴果分配指数的 Logistic 方程参数

品种	处理	参数			$R^2$	$P$
		$K$	$a$	$b$		
中芝 13	CK	$0.856 \pm 0.037a$	$5.101 \pm 0.580a$	$-11.32 \pm 1.389a$	0.959	0.000 1
	W24h	$0.846 \pm 0.038a$	$4.391 \pm 0.456a$	$-9.149 \pm 1.064a$	0.948	0.000 1
	W36h	$0.808 \pm 0.040a$	$4.257 \pm 0.472a$	$-8.266 \pm 1.066a$	0.943	0.000 1
	W48h	$0.802 \pm 0.041a$	$4.415 \pm 0.518a$	$-8.728 \pm 1.168a$	0.918	0.000 1
	W60h	$0.798 \pm 0.047a$	$4.834 \pm 0.702a$	$-9.138 \pm 1.505a$	0.963	0.000 1
郑芝 13	CK	$0.957 \pm 0.042a$	$3.828 \pm 0.371a$	$-8.651 \pm 0.949a$	0.963	0.000 1
	W24h	$0.870 \pm 0.045ab$	$3.365 \pm 0.343a$	$-7.431 \pm 0.898a$	0.961	0.000 1
	W36h	$0.834 \pm 0.045b$	$3.381 \pm 0.368a$	$-7.607 \pm 0.975a$	0.955	0.000 1
	W48h	$0.796 \pm 0.053b$	$3.403 \pm 0.450a$	$-7.476 \pm 1.171a$	0.951	0.000 1
	W60h	$0.792 \pm 0.034b$	$3.473 \pm 0.304a$	$-7.745 \pm 0.793a$	0.933	0.000 1

注： $K$  为相对蒴果分配指数最大模拟值； $a$ 、 $b$  为模型参数。

2.3 芝麻地上部干质量及茎、叶、蒴果相对分配指数的拟合验证

采用 2015 年的试验数据对拟合得到的方程进行检验,实测数据与拟合数据的 1:1 关系图如图 3 所示,实测值与拟合值均匀分布在 1:1 线的两侧,其中地上部干质量、茎相对分配指数、蒴果相对分配指

数的  $RMSE$  分别为 1.16、0.046、0.021,  $NRMSE$  分别为 7.46%、9.79%、9.94%,均小于 10%,拟合准确度极好,叶相对分配指数的  $RMSE$  为 0.043,  $NRMSE$  为 12.54%,拟合准确度好,说明所选方程均能够较好地描述芝麻地上部干物质积累以及茎、叶和蒴果的分配过程。

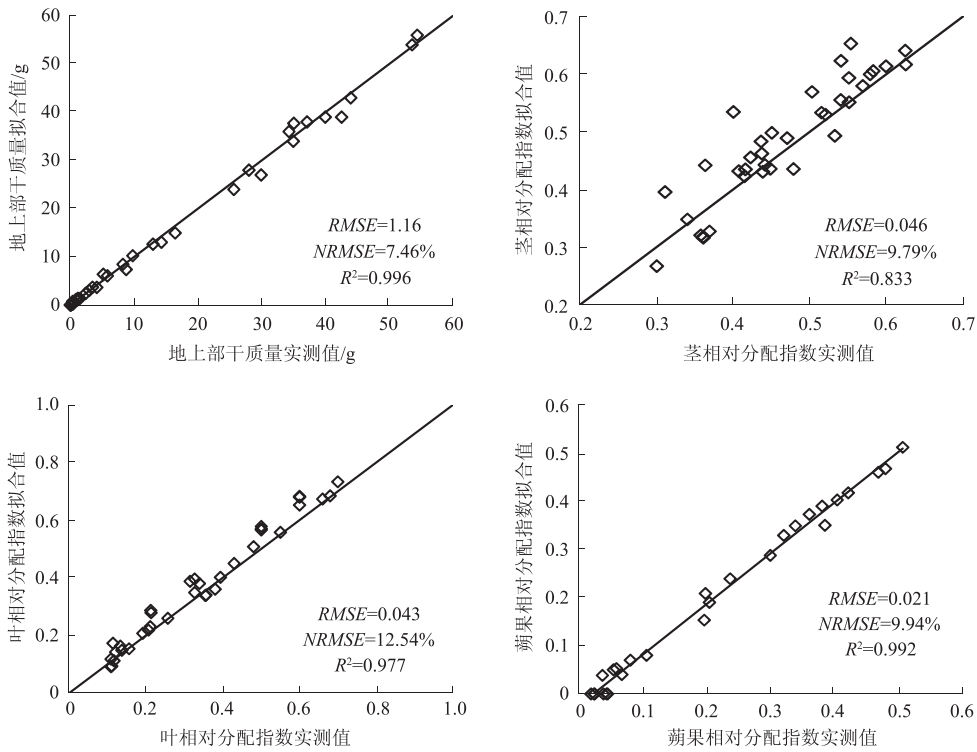


图 3 芝麻干物质积累与各器官分配的拟合值与实测值关系

3 结论与讨论

定量化分析作物干物质积累动态变化可反映不同条件下作物的生长发育特性及规律<sup>[25]</sup>,无论是建模还是计算,首先基本度量单位应统一,归一化方法是归纳统一样本的统计分布性,便于横向比较<sup>[26]</sup>。Logistic 模型不仅可以用于分析水稻、小麦和玉米等粮食作物的干物质积累动态变化特征<sup>[27-29]</sup>,还可以

用于分析大豆、花生等油料作物的干物质积累动态变化特征<sup>[30-31]</sup>,芝麻干物质积累动态总体呈慢—快—慢的 S 形曲线,也可采用 Logistic 方程进行拟合,各处理拟合决定系数均在 0.96 以上。  
两芝麻品种干物质积累的 Logistic 方程中,参数  $K$  值总体表现为随着渍水时间延长而逐渐降低,表明渍水减少了芝麻的干物质积累量,郑芝 13 受渍水影响的程度远大于中芝 13。通过对芝麻干物质积



累特征参数的分析可知,渍水对芝麻干物质积累的影响主要体现在降低了芝麻植株的干物质积累速率,对于不耐渍型芝麻品种郑芝 13,渍水也影响其生育进程。渍水对干物质积累速率达到最大值的时间没有影响,但降低了干物质积累最大速率,从而降低了干物质积累量。

渍水对芝麻地上部干物质分配的影响主要体现在增大茎分配指数,降低蒴果分配指数,对叶分配指数影响不大,这与张银锁等<sup>[32]</sup>得出的胁迫条件下物质向营养器官的分配比例增加而向生殖器官的分配减少的研究结论一致。芝麻茎、叶、蒴果的相对分配指数拟合曲线检验 *NRMSE* 均在 20% 以内,拟合效果好。

#### 参考文献:

- [1] Tuteja N, Gill S S, Tiburcio A F, *et al.* Improving crop resistance to abiotic stress [M]. Germany: Wiley-VCH, 2012; 1251-1283.
- [2] Wang L, Zhang Y, Qi X, *et al.* Global gene expression responses to waterlogging in roots of sesame (*Sesamum indicum* L.) [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(6): 2241-2249.
- [3] 吴文革, 钱银飞, 张洪程, 等. 超级杂交中籼水稻物质生产特性分析[J]. *中国水稻科学*, 2007(3): 287-293.
- [4] 林瑞余, 梁元元, 蔡碧琼, 等. 不同水稻产量形成过程的干物质积累与分配特征[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(2): 185-190.
- [5] 卫双玲, 高桐梅, 吴寅, 等. 高温胁迫对芝麻光合特性及产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(5): 1977-1981.
- [6] 孙建, 张秀荣, 张艳欣, 等. 不同株型芝麻种质湿害后产量性状研究及耐湿性评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2010, 11(2): 139-146.
- [7] 付雪丽. 冬小麦-夏玉米产量性能动态特征及其主要栽培措施效应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [8] 陈亚楠. 丹参性状与干物质分配及产量预测模型研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [9] 李国强, 汤亮, 张文宇, 等. 不同株型小麦干物质积累与分配对氮肥响应的动态分析[J]. *作物学报*, 2009, 35(12): 2258-2265.
- [10] 周静. 温室水果黄瓜生长发育模拟模型研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [11] 徐本生, 王文亮, 籍玉尘. 芝麻干物质积累和需肥规律的研究[J]. *河南农业大学学报*, 1992, 26(4): 331-334.
- [12] 胡金和, 饶月亮, 赵燕, 等. 不同种植密度下黑芝麻干物质积累与产量关系的研究[J]. *江西农业学报*, 2011, 23(7): 84-85.
- [13] 刘文萍, 李芬, 张超美, 等. 华北春芝麻不同栽培条件对干物质的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2003, 25(3): 55-58.
- [14] 刘文萍, 卫双玲, 任果香, 等. 栽培方式对汾芝 2 号产量及干物质的影响[J]. *甘肃农业科技*, 2012(9): 21-23.
- [15] 赵莉, 汪强, 田东丰, 等. 不同施肥水平对芝麻干物质积累与分配的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(6): 129-134.
- [16] 卫双玲, 高桐梅, 张海洋, 等. NEB 肥对芝麻干物质积累及物质转化能力的研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(5): 127-132.
- [17] 丁霞, 王林海, 张艳欣, 等. 我国芝麻主栽品种耐湿性鉴定分析[J]. *华北农学报*, 2012, 27(4): 89-93.
- [18] 刘立峰, 郑磊, 张仙美, 等. 部分芝麻新品种耐渍性鉴定[J]. *作物杂志*, 2012(4): 98-101.
- [19] 刘华山, 孟凡庭, 杨青华, 等. 土壤渍涝对芝麻根系生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *植物生理学报*, 2005, 41(1): 45-47.
- [20] 王文泉, 郑永战, 梅鸿献, 等. 不同耐渍基因型芝麻在厌氧胁迫下根系的生理与结构变化[J]. *植物遗传资源学报*, 2003, 4(3): 214-219.
- [21] 江诗洋, 黎冬华, 张艳欣, 等. 水涝胁迫下芝麻内源激素及表型响应[J]. *中国油料作物学报*, 2015, 37(5): 676-682.
- [22] 周萌, 李国强, 张建涛, 等. 盛花期渍水后芝麻干物质积累分配及产量变化[J]. *中国油料作物学报*, 2016, 38(5): 598-604.
- [23] 钱婷婷. 迷你型黄瓜生长发育定量化研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- [24] 李国强, 陈丹丹, 张建涛, 等. 基于 DSSAT 模型的河南省小麦生产潜力定量模拟与分析[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(4): 507-515.
- [25] Yan D, Zhu Y, Wang S, *et al.* A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice[J]. *Plant Production Science*, 2006, 9(2): 93-105.
- [26] 刘娟, 熊淑萍, 杨阳, 等. 基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型[J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5512-5520.
- [27] 黄丽芬, 全晓艳, 张蓉, 等. 光氮及其互作对水稻干物质积累与分配的影响[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(2): 167-176.
- [28] 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[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 300-308.
- [29] 王小春, 杨文钰, 邓小燕, 等. 玉米/大豆和玉米/甘薯模式下玉米干物质积累与分配差异及氮肥的调控效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 46-57.
- [30] 赵婧, 邱强, 张鸣浩, 等. 大豆在不同铁水平下生理特性与品种耐性的关系[J]. *核农学报*, 2016, 30(11): 2239-2247.
- [31] 刘佳, 张杰, 秦文婧, 等. 施氮和接种根瘤菌对红壤旱地花生生长及氮素累积的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(12): 2441-2450.
- [32] 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[J]. *作物学报*, 2002, 28(1): 104-109.