

涝渍胁迫条件下 Morgan 模型的试验研究

钱 龙, 王修贵*, 罗文兵, 吴 琳

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 涝渍胁迫条件下的作物水分生产函数对于正确评估减灾效益, 合理制定涝渍灾害治理对策具有重要现实意义。作物水分生产函数按照模型形式可分为动态模型与静态模型, 其中动态模型能模拟作物生长过程, 具备一定的作物生理学基础, 但鲜有见到关于涝渍胁迫条件下动态模型的研究。该文以水分亏缺条件下的作物水分生产函数动态模型 (Morgan 模型) 为基础, 通过利用涝渍指标进行转换, 建立了适用于涝渍胁迫条件下的动态产量模型。该模型选用的指标包括常用的空间划分型涝渍分离指标 (累积超标准地下水深 SEW_{30} 、地面累积淹水深度 SFW) 与涝渍综合指标 $SFEW_{30}$, 并为了克服前者在计算过程中涝害指标权重偏小的问题, 引入时间划分型涝渍分离指标 (累积超标准地下水深 SEW_{30} 、受涝期间涝渍综合指标 $SWFDH$)。根据连续多年的棉花涝渍胁迫试验数据对模型进行参数率定与验证, 结果表明该模型预测效果良好, 并推荐优先使用涝渍综合指标 $SFEW_{30}$ 。同静态模型相比, 该模型参数在年际之间也表现出更好的稳定性。

关键词: 胁迫, 动态, 模型, 涝渍, 作物水分生产函数, Morgan 模型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.16.012

中图分类号: S154.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-16-0092-10

钱 龙, 王修贵, 罗文兵, 等. 涝渍胁迫条件下 Morgan 模型的试验研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 92-101.

Qian Long, Wang Xiugui, Luo Wenbing, et al. Experimental study on Morgan model under waterlogging stress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 92-101. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

涝渍胁迫是危害作物生长与产量的主要自然灾害之一, 其导致的土壤通气不良、缺氧状况会使土壤处于还原状态, 进而影响作物水分和养分的摄取, 严重制约作物的生长发育与产量形成^[1]。作物水分生产函数是描述水分与产量之间关系的数学模型, 研究涝渍胁迫条件下的作物水分生产函数对于定量分析涝渍胁迫对作物生长及产量的影响, 正确评估减灾效益, 合理制定涝渍灾害治理对策具有重要现实意义。

目前对于作物水分生产函数的研究多侧重于水分亏缺条件, 对涝渍胁迫条件下的研究相对较少。而已有的涝渍胁迫条件下的作物水分生产函数又多侧重于统计分析, 如相关学者先后建立了累计超标准地下水深

(SEW_{30})^[2]、累计超标准地面水深 (SFW)^[3]、累计综合涝渍水深 ($SFEW_{30}$)^[4]、涝渍连续抑制天数 ($CSDI$)^[5-7]、等效淹渍历时 (SFD)^[8]、受涝时间 (T_x)、降渍时间 (T_w)^[9]等涝渍指标与作物产量之间的统计关系。在研究不同涝渍指标与作物最终产量的简单统计模型的基础上, 又有学者借鉴水分亏缺条件下作物水分生产函数中的相乘模型与相加模型, 以作物生理指标、形态指标以及涝渍综合指标作为影响因子, 构建了涝渍胁迫条件下的作物水分生产函数, 并通过涝渍胁迫试验得到验证, 效果良好^[10]。但目前关于涝渍胁迫条件下作物水分生产函数动态模型的研究还很少见。吴琳^[11]、曹光^[12]通过将 Morgan 模型中的土壤水分指标替换为涝渍胁迫指标, 初步建立起了涝渍胁迫条件下的 Morgan 模型, 但试验数据年份少, 采用的涝渍指标单一。本文在上述研究的基础上, 利用武汉大学灌排综合试验场 2008—2011 年连续 4 a 的棉花涝渍胁迫试验数据, 分别建立了涝渍胁迫条件下的 Morgan 模型与涝渍胁迫条件下的静态统计模型, 比较了两者的有效性和适用性, 并对模型中采用的多类指标进行了比较分析。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于 2008—2011 年在武汉大学灌排综合试验

收稿日期: 2013-05-26 修订日期: 2013-07-23

基金项目: 国家自然科学基金 (50979074) 项目; “十二五” 国家科技支撑计划项目 (2012BAD08B03); 中央高校基本科研业务费专项资金 (206274004) 资助。

作者简介: 钱 龙 (1988—), 男, 汉, 湖北武汉人, 博士生, 主要从事农田排水方面研究。武汉 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 430072。Email: 2011202060121@whu.edu.cn

*通信作者: 王修贵 (1962—), 男, 湖北广水人, 教授, 博士生导师, 主要从事农田排水及水管理方面研究。武汉 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 430072。Email: wangxg@whu.edu.cn

场进行。试验场共有测坑 22 个，另设有保护带，保护带中的土壤条件、作物品种、播种时间均与测坑内相同，除了保护测坑的试验研究条件之外，还用以定期采集与测坑内棉株长势（株高、茎粗）一致的棉株进行干物质产量测定。每个测坑面积为 4 m²（2 m×2 m），深度为 3.0 m，底部设置了 0.3 m 厚的反滤层，其余 2.7 m 装填了扰动土，填土层表面距坑顶 0.1 m 左右。土壤为轻壤土，土壤的有关参数为：干容重 1.41 g/cm³，饱和含水率 44.4%，田间持水率 37%（含水率均为体积含水率）。供试棉花品种为鄂抗棉 6 号。每年 5 月下旬每个测坑定植棉花六株。

1.2 研究方法

试验设计是使棉花在不同生育期内遭受不同程度的涝渍胁迫处理，受试因素有涝、渍两个因素，各因素的控制要求为：涝：淹水深度 10 cm，2008—2010 年淹水历时为 1 d、3 d，2011 年淹水历时为 1、3、5 d；渍：采用淹水后地面水完全排除后地下水位维持在埋

深 30 cm 的时间来控制，之后将地下水位迅速降至适宜埋深 80 cm。2008—2009 年控制时间为 3、5 d，2010 年控制时间为 4、7 d，2011 年控制时间为 3、5、8 d。在非胁迫生育阶段，采用合理的灌溉制度对测坑中的棉花进行灌溉，以保证棉花不受旱，并通过使用活动遮雨棚使棉花不受涝。2008—2010 年安排 8 个涝渍胁迫处理和 1 个对照处理，共 9 组方案，其中 2008 年采用了 18 个测坑，2009 年采用了 21 个测坑（6 号测坑维修），2010 年采用了 22 个测坑。2011 年为 9 个涝渍胁迫处理和 1 个对照处理，共 10 组方案，采用了 22 个测坑。由于测坑数量有限，每个处理设置 2~3 个重复。具体的各测坑处理布置方案见表 1。除 2008 年外，后续的试验设计在前面试验结果的基础上有所调整，因而各年的试验设计不同。通过 2008-2010 年的试验结果可知，棉花的花铃期为涝渍最敏感时期，为减少试验工作量，故 2011 年只在花铃期内进行了涝渍处理。具体试验设计见表 2。

表 1 2008—2011 年各测坑处理布置方案

Table 1 Laying out schemes of lysimeter Treatments in 2008—2011

2008		2009		2010		2011	
处理号 Treatments number	测坑号 Lysimeter number	处理号 Treatments number	测坑号 Lysimeter number	处理号 Treatments number	测坑号 Lysimeter number	处理号 Treatments number	测坑号 Lysimeter number
1	1,15	1	1,15	1	1,15	1	1,11
2	2,16	2	2,16	2	2,16	2	2,12
3	3,17	3	3,8	3	3,8	3	3,13
4	4,19	4	4,9,19	4	4,6,19	4	4,14
5	5,20	5	5,20	5	5,20	5	5,15
6	6,11	6	7,11	6	7,11	6	6,16
7	7,12	7	12,17	7	9,12,17	7	7,17
8	13,22	8	13,18,22	8	13,18,22	8	8,18
9	14,21	9	21,10,14	9	10,14,21	9	19,21
-	-	-	-	-	-	10	9,10,20,22

注：表中“-”表示当年没有此项处理。

Note: “-” in the table means there is no such treatment in that year.

表 2 2008—2011 年棉花涝渍试验设计

Table 2 Waterlogging stress treatments of the experiment on cotton in 2008—2011

处理号 Treatments number	2008、2009						2010						2011	
	蕾期 Bud stage		花铃期 Blossing and boll-forming stages		吐絮期 Boll opening period		蕾期 Bud stage		花铃期 Blossing and boll-forming stages		吐絮期 Boll opening period		花铃期 Blossing and boll-forming stages	
	涝/d	渍/d	涝/d	渍/d	涝/d	渍/d	涝/d	渍/d	涝/d	渍/d	涝/d	渍/d	涝/d	渍/d
1	1	3	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	1	0
2	3	5	0	0	0	0	3	7	0	0	0	0	3	0
3	0	0	1	3	0	0	0	0	1	4	0	0	5	0
4	0	0	3	5	0	0	0	0	3	7	0	0	0	3
5	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	1	4	0	5
6	0	0	0	0	3	5	0	0	0	0	3	7	0	8
7	1	3	1	3	1	3	1	4	1	4	1	4	1	3
8	3	5	3	5	3	5	3	7	3	7	3	7	3	5
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	8
10 (对照)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注：表中“涝/d”表示在淹水深度为 10 cm 条件下的淹水历时，d；“渍/d”表示在地面淹水完全排除后地下水位维持在 30 cm 的渍水历时，d。2008—2010 年只设置了 9 个处理组，2011 年设置了 10 个处理组，表中“-”表示当年未设置此种试验方案。

Note: “surface waterlogging/d” in the table represents the duration(d) under the flood depth of 10cm;the “subsurface waterlogging/d” represents the duration(d) under maintaining the groundwater table of 30cm after draining off surface water. The number of treatments from 2008 to 2010 is 9 while there is 10 in 2010.“-” in the table means there is no such treatment in that year.

1.3 观测内容

主要的观测项目有：1) 在涝渍胁迫处理期间每天用地下水计观测地下水位，一直观测到地下水位达到正常埋深 80 cm 以下；2) 棉花开始涝渍处理前的初始干物质产量，以后每隔 10 d 左右从保护带中采集样本，称量棉花干物质烘干后的重量。由于保护带中棉株数量有限，且处理组数量与采样阶段均较多，故每次采样时仅为每种处理采集一棵生长态势（株高、茎粗）与测坑对应处理相近的棉株作为样本；3) 每次在开展涝渍胁迫实验（灌水）之前，测定测坑土壤的地表含水率。2008 年在棉花蕾期、花铃期、吐絮期 3 个生育阶段内均设有涝渍胁迫处理，共有 3 次灌水过程，18 个测坑在 3 次灌水前的表土（0~5 cm）体积含水率（下同）分别为：24.52%~31.81%，26.57%~37.27%，16.52%~30.4%，平均含水率分别为：29.23%，30.49%，22.75%。2009 和 2010 年未测量灌水前地表含水率。2011 年仅在花铃期内设有涝渍胁迫处理，22 个测坑在灌水前的表土（0~5 cm）含水率为：14.13%~24.99%，平均含水率为 19.88%。从监测的表层土壤含水率来看，各测坑灌前有一定的差异，主要是各测坑土壤密实程度、渗透性等存在一定的差异，但表层含水率在田间持水率的 38%~100%，表层以下土壤墒情良好，且作物的长势正常，各测坑均不存在旱象或渍涝状态。

2 作物水分生产函数动态模型——Morgan 模型

2.1 模型形式

Hanway^[13]认为，在充分供水条件下，作物干物质相对累积量的递推公式为

$$\frac{Dy_t}{Dy_{t-1}} = \Gamma(t) \quad (1)$$

式中， $\Gamma(t)$ 为理想状况下干物质产量增长率； Dy_{t-1} 、 Dy_t 分别为理想状况下第 $t-1$ 日及第 t 日的干物质产量。根据递推公式，可以得出收获时的干物质产量表达式如下

$$Dy_T = Dy_0 \prod_{t=1}^T \Gamma(t) \quad (2)$$

式中， Dy_T 为最终干物质产量； Dy_0 为计算起始日的干物质产量； T 为试验实际生育期的总天数，d。

式（2）是在供水充分条件下推导出来的最终干物质总量的计算公式，然而在实际农业生产过程中，农田水分状况往往难以达到理想条件从而成为影响作物生长的主要因素，因此，根据实际土壤水分状况，需对式（1）进行如下修正^[14]

$$\frac{X_t}{X_{t-1}} = \Gamma(t)P(Am_t) \quad (3)$$

式中， X_{t-1} 、 X_t 分别为实际情况下第 $t-1$ 日及第 t 日的干物质产量； $P(Am_t)$ 为实际土壤水分状况修正系数，可称为水分亏缺影响函数，它会随土壤相对有效含水率 Am_t 的变化而变化。

函数 $P(Am_t)$ 具备如下特性：1) 单调递增；2) 当土壤水分处于理想状况时，即土壤含水率为田间持水率时， $P(Am_t)=1$ ；3) 当土壤水分严重不足，达到使作物停止生长的土壤水分吸力时，时段始末干物质产量相同，此时 $P(Am_t) = \frac{1}{\Gamma(t)}$ 。

由式（3）递推关系可知，在养分供应充足且其它农业技术措施均为正常的条件下，不同水分条件下的棉花干物质产量最终模型为

$$X_T = Dy_0 \prod_{t=1}^T \Gamma(t)P(Am_t) \quad (4)$$

式中， X_T 为实际最终干物质产量，其它符号含义同前。

2.2 水分亏缺影响函数

Morgan 等^[14]根据玉米试验结果，提出一种指数形式的水分亏缺影响函数，即

$$P(Am_t) = \Gamma(t)^{\sigma(Am_t)-1} \quad (5)$$

将式（5）代入式（4），得最终干物质产量计算式如下

$$X_T = Dy_0 \prod_{t=1}^T \Gamma(t)^{\sigma(Am_t)} \quad (6)$$

式中， $\sigma(Am_t)$ 为土壤水分响应函数，具备如下性质：1) 单调增函数；2) 当 $Am_t=0$ 时， $\sigma(Am_t)=0$ ；3) 当 $Am_t=1$ 时， $\sigma(Am_t)=1$ 。

根据以上性质，相关学者考虑将函数 $\sigma(Am_t)$ 选用为如下几种形式^[15-16]：1) 分段函数；2) 指数函数；3) 多项式函数。

3 涝渍胁迫条件下 Morgan 模型的建立

涝渍胁迫条件下，限制作物生长的主要因素是水分过多。王修贵等^[17]认为，受渍条件下土壤通气性不良、旱作物生长所需养分的供应受限，其表现与水分亏缺环境限制作物生长有着相似的机理。因此可通过选取适宜的涝渍指标，替换水分亏缺条件下 Morgan 模型中的土壤水分指标，建立适用于涝渍胁迫条件下的 Morgan 模型。

3.1 涝渍指标的选择

为使 Morgan 模型在涝渍胁迫条件下更具实用性，需选择较为常用、易于观测且能较好体现涝渍胁迫程度的指标来描述涝渍胁迫条件下的水分状况。涝渍指标可分为涝渍分离与涝渍综合两类指

标，前者假定涝渍胁迫过程中涝害与渍害具有一定的独立性，两者对作物的影响程度并不相同，而后者假定涝害与渍害对作物生长与产量的影响具有相似的机理^[18]。本文分别选取这两类指标作为 Morgan 模型中的水分胁迫指标。

3.1.1 涝渍分离指标

将涝害与渍害视作两类相对独立的影响因素，分别选取地表累计水深与地下超标准累计水深作为描述涝害与渍害的指标。根据对涝渍胁迫灾害中涝害与渍害划分方式的不同，涝渍分离指标又可分为按时间划分与按空间划分的 2 类指标。为明确定义并区分这两类涝渍分离指标，现假设有某一降雨过程（如图 1 所示），涝害与渍害的总量是一定的（图中标记区域）。按时间划分是指在每个计算分析期内，以地面有无积水作为受涝或者受渍的时间分界线，地面有积水时，将地面累计水深和地下超标准累计水深二者之和 $SWFDH$ 作为涝害指标，地面无积水时，地表以下的超标准累计水深 SEW_x 作为渍害指标（见图 1a）；按空间划分则是指在每个计算分析期内，以地表为划分界限，地表以上的累计水深 SFW 作为涝害指标，地表以下的超标准累计水深 SEW_x 作为渍害指标（见图 1b）。按空间划分的涝渍分离指标是基于涝害和渍害的定义，同时，考虑地表淹水和地下渍水对作物生长及产量影响的不同，现有的涉及到涝渍分离指标的文选均按空间进行划

分^[3,4,8,18]。按时间划分的涝渍分离指标考虑了涝害期间地下水和地表水相伴相随特性，同时，也避免了按空间划分时导致渍害比重过大的问题。

1) 按空间划分的涝渍分离指标包括渍害指标 (SEW_x) 和涝害指标 (SFW)

$$SEW_x = \sum_{t=1}^n (X - d_t) \quad (7)$$

$$SFW = \sum_{t=1}^n h_t \quad (8)$$

其中， SEW_x 为累计超标准地下水深， $cm \cdot d$ ； d_t 为涝渍连续过程中第 t 日地下水埋深， cm ；当 $d_t > X$ 时，取 $d_t = X$ ，本试验中 X 取为 $30cm$ ；当 $d_t < 0$ 时，取 $d_t = 0$ ； SFW 为地面累计淹水深度， $cm \cdot d$ ； n 为计算分析期， d ； h_t 为第 t 日地表平均淹水深， cm 。

2) 按时间划分的涝渍分离指标

$$SWFDH = SFW + SWDH \quad (9)$$

$$SWDH = T_w X \quad (10)$$

$$SEW_x = \sum_{t=1}^{n'} (X - d_t) \quad (11)$$

其中， $SWFDH$ 为受涝期间涝渍综合指标， $cm \cdot d$ ； $SWDH$ 为受涝期间地下水动态指标， $cm \cdot d$ ； T_w 为淹水历时， d ； X 为分析期内地下水埋深特定值，在本试验中取 $30 cm$ ； n' 为涝去渍存期间的天数， d ；其他符号含义同前。

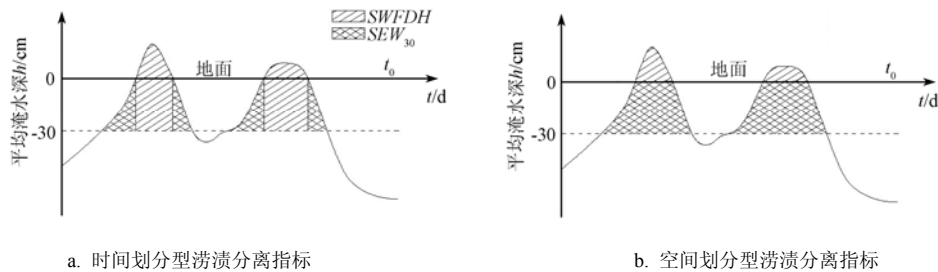


图 1 涝渍分离指标划分示意图
a. 时间划分型涝渍分离指标
a. Surface-subsurface separated indexes divided by time
b. 空间划分型涝渍分离指标
b. Surface-subsurface separated indexes divided by space
注： SEW_{30} 为累积超标准地下水深， cm ； $SWFDH$ 为受涝期间涝渍综合指标， cm 。

Fig.1 Diagrammatic sketch of surface-subsurface separated indexes

3.1.2 涝渍综合指标

将涝渍胁迫过程看作一个连续完整的过程，以涝渍双因子指标之和 $SFEW_{30}$ 作为涝渍综合指标来衡量涝渍灾害程度，其表达式如下

$$SFEW_{30} = SFW + SEW_{30} = SWFDH + SEW_{30} \quad (12)$$

式中， $SFEW_{30}$ 为涝渍综合指标， $cm \cdot d$ ；其他符号含义同前。

3.2 模型的建立

将水分亏缺条件下 Morgan 模型中的水分限制指标 Am_t 分别替换为按空间划分的涝渍分离指标 (SEW_{30} , SFW)、按时间划分的涝渍分离指标

(SEW_{30} , $SWFDH$) 以及涝渍综合指标 ($SFEW_{30}$)，代入式 (6) 可得

$$X_T = Dy_0 \prod_{t=1}^T \Gamma(t)^{\sigma(SEW_{30}, SFW)} \quad (13)$$

$$X_T = Dy_0 \prod_{t=1}^T \Gamma(t)^{\sigma(SEW_{30}, SWFDH)} \quad (14)$$

$$X_T = Dy_0 \prod_{t=1}^T \Gamma(t)^{\sigma(SFEW_{30})} \quad (15)$$

式中， SEW_{30} , SFW , $SWFDH$, $SFEW_{30}$ 为各个阶段测得的涝渍排水指标，可通过每日实测地表水深及

地下水位计算得出；其他符号含义同前。

$\Sigma(SEW_{30}, SFW)$ 、 $\sigma(SEW_{30}, SWFDH)$ 可被称为涝渍分离指标响应函数， $\sigma(SEW_{30})$ 可被称为涝渍综合指标响应函数，其函数可选形式与原 Morgan 模型中 $\sigma(Am_t)$ 函数可选形式相似，可分为分段函数、指数函数以及多项式函数三大类。分别选用各类模型形式进行参数率定与模型验证，结果表明，当模型参数过多时（如选用二次函数与三次函数或分段函数），率定结果年际稳定性较差，且预测效果较一次函数未有明显提高；当选用指数函数时，参数个数较少，预测效果与一次函数十分接近，但计算过程较为复杂；当选用一次函数时，参数率定结果稳定，模型预测效果良好，且模型参数少。综上所述，本文将涝渍指标响应函数的具体形式选定为线性函数

$$\sigma(SEW_{30}, SFW) = aSEW_{30} + bSFW + c \quad (16)$$

$$\sigma(SEW_{30}, SWFDH) = a'SEW_{30} + b'SWFDH + c' \quad (17)$$

$$\sigma(SEW_{30}) = a''SEW_{30} + b'' \quad (18)$$

与原 Morgan 模型中 $\sigma(Am_t)$ 函数性质相对应， $\sigma(SEW_{30}, SFW)$ 、 $\sigma(SEW_{30}, SWFDH)$ 、 $\sigma(SEW_{30})$ 应满足

1) 随涝渍排水指标的增加而单调递减；

2) 当 $SEW_{30}=0$ 、 $SEW=0$ 、 $SEW_{30}=0$ 、 $SWFDH=0$ 或 $SEW_{30}=0$ 时，有

$$\sigma(SEW_{30}, SFW) = aSEW_{30} + bSFW + c = 1 \quad (19)$$

$$\sigma(SEW_{30}, SWFDH) = a'SEW_{30} + b'SWFDH + c' = 1 \quad (20)$$

$$\sigma(SEW_{30}) = a''SEW_{30} + b'' = 1 \quad (21)$$

由式 (19) ~ 式 (21) 可得： $c=1$ ， $c'=1$ ， $b''=1$ 。

将式 (16) ~ 式 (18) 代入式 (13) ~ 式 (15) 可得涝渍胁迫条件下 Morgan 模型的最终干物质产量计算式

$$X_T = Dy_0 \prod_{t=1}^T \Gamma(t)^{aSEW_{30} + bSFW + 1} \quad (22)$$

$$X_T = Dy_0 \prod_{t=1}^T \Gamma(t)^{a'SEW_{30} + b'SWFDH + 1} \quad (23)$$

$$X_T = Dy_0 \prod_{t=1}^T \Gamma(t)^{a''SEW_{30} + 1} \quad (24)$$

3.3 模型参数率定

土壤供水充分条件下（即理想的土壤水分状况）的作物干物质产量增长率 $\Gamma(t)$ 可由下式计算得到

$$\Gamma(t) = \frac{H_t}{H_{t-1}} \quad (25)$$

式中， H_t 为第 t 日干物质累计值与干物质总量累计值之比。Morgan 通过对 Hanway 给出的作物干物质累积曲线进行拟合，得到 H_t 的确定方法^[14]

$$H_t = \exp[c + \sigma(t - t^2 / 2T)] \quad (26)$$

式中， c 、 σ 是待定参数，随环境而改变； T 是作物生育期总天数， d 。

在涝渍胁迫条件下，土壤水分供应过剩，成为作物生长的限制因子，此时应利用每年试验中对照组的连续干物质数据对 c 、 σ 进行率定，结果如表 3 所示。

表 3 2009—2010 年模型参数 c 、 σ
Table 3 Model parameters c , σ in 2009—2010

年份 Year	c	偏差 Deviation/%	σ	偏差 Deviation/%	T/d	样本容量 Sample size	相关系数 Correlation coefficient	相对误差 Relative error/%
2009	-12.7328	2.84	0.1506	3.15	169	9	0.9868	2.37
2010	-12.3402	0.33	0.1455	0.34	175	12	0.9713	15.26
2009-2010	-12.3809	-	0.146	-	-	21	0.9777	11.07

由表 3 可知，2009 和 2010 年分别率定的 c 、 σ 值与 2 a 综合率定的参数的偏差很小，因此在作物种类与生长环境不变且土壤水分状况理想的条件下，作物干物质产量累积曲线是十分稳定的。在后续计算中， c 和 σ 均采用 2009—2010 年的综合率定值。

由式 (25)、式 (26) 可得出干物质产量增长率 $\Gamma(t)$ 的计算表达式

$$\Gamma(t) = \exp[\sigma(1 + 1/2T - t/T)] \quad (27)$$

根据 2008—2011 年的实测数据，利用式 (27)

可计算出逐年的棉花干物质产量增长率。根据干物质采样时间，可将棉花生育期划分为若干阶段，即棉花的生长阶段，并计算出各阶段的干物质产量增长率（见表 4）。2008—2010 年在棉花吐絮期以前干物质采样间隔时间为 10 d（部分因天气等原因提前或推后 1~2 d），当后期干物质产量增长速度趋于缓慢时，采样间隔时间延长至 15 d 左右。由于 2011 年未进行干物质阶段性采样，故不依照干物质采样时间来划分阶段，而是计算出逐日干物质产量增产率。

表 4 2008—2011 年棉花各生长阶段干物质产量增长率
Table4 The cotton growth rate in 2008—2010

生长阶段 Growth stage	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2008	2.649	2.728	2.741	1.965	1.965	2.085	1.987	1.479	1.571	1.498	1.357	1.098
2009	2.077	1.9	1.738	1.657	1.441	1.318	1.223	1.105				
2010	2.899	2.667	2.252	2.462	2.226	1.786	1.76	1.62	1.598	1.703	1.18	

注：各年份生长阶段的划分因干物质采样时间而异。

Note: the division of growth stages in different years varies with the sampling time of the dry matter.

3.4 模型计算

根据实测逐日地下水位资料，利用式 (7) ~ 式(10)计算修正 Morgan 模型中所需的阶段 SEW_{30} 、 SFW 、 $SFEW_{30}$ 、 $SWFDH$ 值。需要说明的是，为避免因指标系数数值过小而导致计算过程产生较大误差，本文将指标的单位转换为 $m \cdot d$ (1 $m \cdot d$ 等于 100 $cm \cdot d$)。

将式 (22) ~ 式 (24) 两边取对数，整理后得

$$\ln \frac{X_T}{Dy_0} - \sum_{t=1}^T \ln \Gamma(t) = a \sum_{t=1}^T SEW_{30} \ln \Gamma(t) + b \sum_{t=1}^T SFW \ln \Gamma(t) \quad (28)$$

$$\ln \frac{X_T}{Dy_0} - \sum_{t=1}^T \ln \Gamma(t) = a' \sum_{t=1}^T SEW_{30} \ln \Gamma(t) + b' \sum_{t=1}^T SWFDH \ln \Gamma(t) \quad (29)$$

$$\ln \frac{X_T}{Dy_0} - \sum_{t=1}^T \ln \Gamma(t) = a'' \sum_{t=1}^T SFEW_{30} \ln \Gamma(t) \quad (30)$$

根据 9 个不同涝渍胁迫处理组的实测数据，通过多元线性回归可拟合出参数 a 、 b 、 a' 、 b' 以及 a'' 的值。

为了验证修正 Morgan 模型具有年际适用性，选取 2008—2011 四年中有连续干物质产量实测数据的两年 (2009 年 21 个测坑产量数据, 2010 年 22 个测坑产量数据) 进行参数率定 (率定结果见表 5)，再利用另外两年 (2008, 2011 年) 的最终干物质产量进行模型验证。

表 5 不同涝渍指标模型的 2009 与 2010 综合率定参数

Table 5 Parameters of models with different waterlogging indexes in 2009 and 2010

模型指标 Model index	参数 Parameter		样本容量 Sample size	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance level	平均相对误差 Average relative error/%
(SEW_{30} , SFW)	$a=-0.1211$	$b=0.3657$	43	0.3219	0.05	13.98
(SEW_{30} , $SWFDH$)	$a'=0.0814$	$b'=-0.2642$	43	0.3169	0.05	14.31
($SFEW_{30}$)	$a''=-0.0916$		43	0.3225	0.05	13.77

4 修正 Morgan 模型的检验

利用 2009、2010 年综合率定的参数确定修正

Morgan 模型，并将 2008、2011 年实测数据代入此模型进行干物质产量验证计算，结果如图 2~ 图 4 所示。

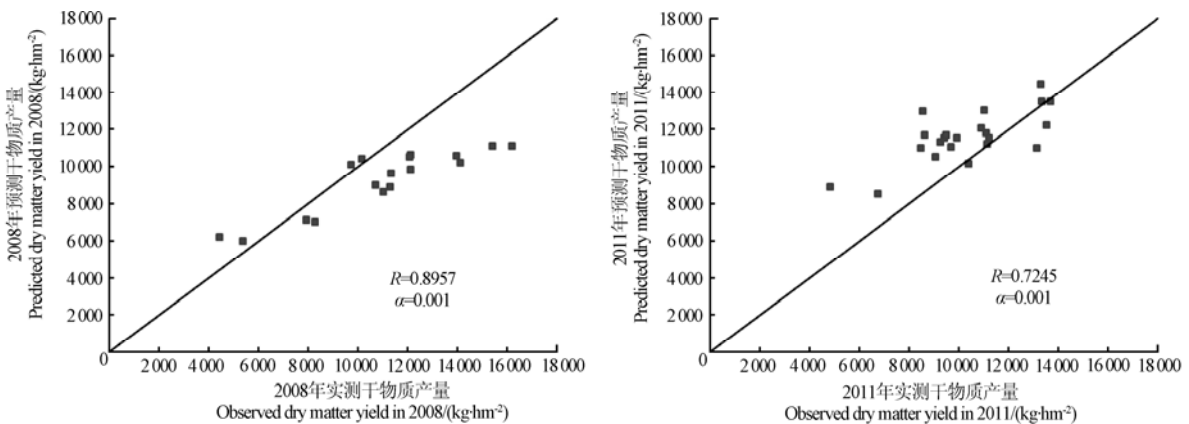


图 2 SEW_{30} 与 SFW 涝渍分离指标 Morgan 模型检验

Fig.2 Verification of the Morgan model with SEW_{30} and SFW index

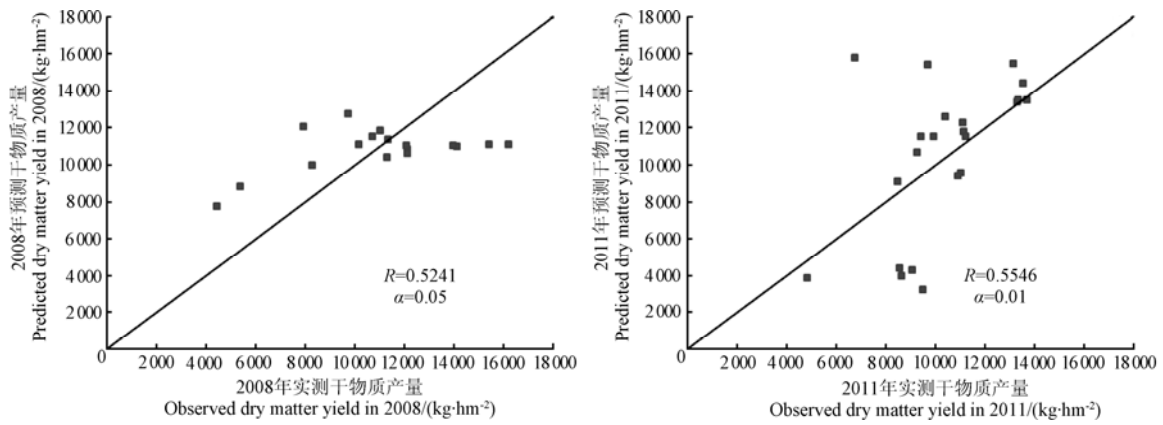


图 3 SEW_{30} 与 $SWFDH$ 涝渍分离指标 Morgan 模型检验

Fig.3 Verification of the Morgan model with SEW_{30} and $SWFDH$ index

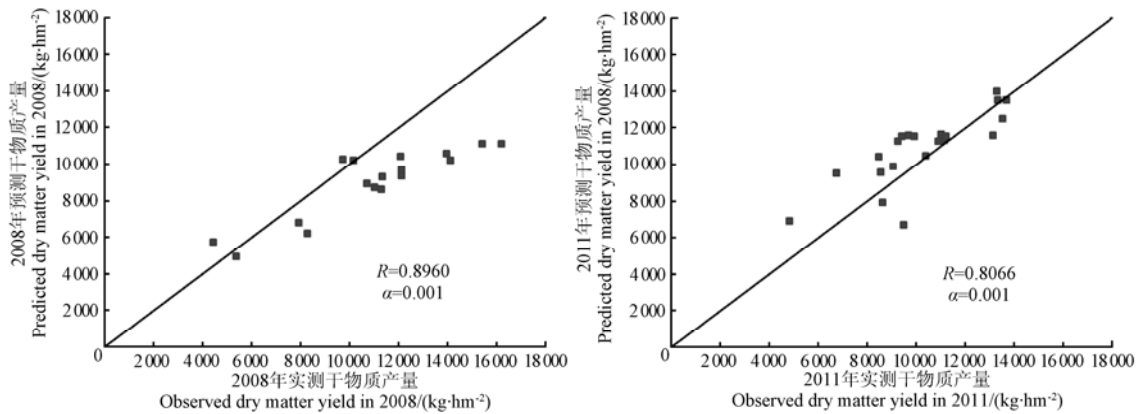


图 4 SEW_{30} 涝渍综合指标 Morgan 模型检验

Fig.4 Verification of the Morgan model with SEW_{30} index

由上图可知，三种形式的修正 Morgan 模型对产量的预测均与实际产量吻合良好，大部分图形中点据基本分布在 45°直线的两侧，说明预测产量与实测产量基本上是一致的。3 种形式的修正 Morgan 模型的预测效果均达到一定的显著性水平（见表 7），除第 2 种修正模型的相关系数在 0.7 以下，其他两种均超过 0.7。由此可见，用涝渍指标替换 Morgan 模型中的土壤水分状况指标来建立适用于涝渍胁迫条件下的作物水分生产函数动态模型是合理可行的。

5 Morgan 模型与静态模型比较

目前相关学者已建立起各类涝渍指标与作物

相对产量之间的数学统计关系，可统称为静态模型^[11]。静态模型所需参数少、应用方便，但缺乏作物生理学基础。为进一步探讨修正 Morgan 模型的有效性和普遍性，本文采用 2009 与 2010 两年的棉花最终干物质产量和涝渍排水指标实测数据进行多元线性回归分析^[10]，综合率定出适用于当地的静态模型参数，建立静态统计模型（见表 6），并将其与修正 Morgan 模型进行比较。

分别利用 2008 年 18 个测坑和 2011 年 22 个测坑的棉花最终干物质产量数据对静态模型进行验证，同时将其与修正 Morgan 模型的产量预测结果进行比较。2008 和 2011 年验证计算的样本容量分别为 18 和 22，结果见表 7。

表 6 不同涝渍指标对应的静态模型
Table 6 Static models with different waterlogging indexes

指标类型 Index type	模型具体形式 Specific forms of the model	样本容量 Sample size	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance level	平均相对误差 Average relative error/%
(SEW_{30} , SFW)	$Ry=1-0.03035SEW_{30}+0.112403SFW$	43	0.3513	0.05	10.0190
(SEW_{30} , $SWFDH$)	$Ry=1-0.02388SEW_{30}-0.01259SWFDH$	43	0.3436	0.05	10.1096
($SFEW_{30}$)	$Ry=1-0.01763SFEW_{30}$	43	0.3357	0.05	10.0246

表 7 修正 Morgan 模型和静态模型的产量模拟效果比较
Table 7 Comparison between the revised Morgan model and the static model

模型类型 Model type	选用指标 Selected indexes	2008			2011		
		相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance level	平均相对误差 Average relative error/%	相关系数 Correlation coefficient	显著性水平 Significance level	平均相对误差 Average relative error/%
修正 Morgan	(SEW_{30} , SFW)	0.89573	0.001	17.1876	0.72446	0.001	17.2570
	(SEW_{30} , $SWFDH$)	0.52405	0.05	20.7945	0.55463	0.01	21.6621
	($SFEW_{30}$)	0.89598	0.001	18.9495	0.80659	0.001	11.5767
静态模型	(SEW_{30} , SFW)	0.78849	0.001	31.9358	-0.19955	大于 0.1	19.5501
	(SEW_{30} , $SWFDH$)	0.81139	0.001	29.8721	0.32596	大于 0.1	18.0742
	($SFEW_{30}$)	0.77506	0.001	30.2893	0.26206	大于 0.1	18.1167

注：显著性水平值小于 0.01 是极显著相关关系，小于 0.05 是显著相关关系，大于 0.05 是不显著相关关系。

Note: significance level less than 0.01 represents highly significant correlation, less than 0.05 represents significant correlation, more than 0.05 represents no significant correlation.

由表 6 和表 7 可得以下结论：

1) 就模型预测结果的相关系数而言，除 2008 年按时间划分的涝渍分离指标 (SEW_{30} 、 $SWFDH$) 的 Morgan 模型的相关系数低于同年相同指标的静态模型外，其他修正 Morgan 模型的相关系数均高于静态模型的相关系数；就模型预测结果的相对误差而言，除涝渍分离指标 (SEW_{30} 、 $SWFDH$) 的 Morgan 模型的相对误差略高于 20% 外，其他修正 Morgan 模型的相对误差均小于 20%，但静态模型在 2008 年的相对误差较大，均在 30% 左右。综上所述，修正 Morgan 模型预测作物产量较静态模型预测效果更好。

2) 静态模型在 2008 年的相关系数较高但相对误差较大，在 2011 年的相对误差较低但相关系数过低，静态模型对 2008 和 2010 两年棉花干物质产量的预测效果有很大的不同，表明该模型年际之间的稳定性较差。而修正 Morgan 模型对于 2008 与 2011 年的预测效果更为稳定，说明该模型在年际之间适应性良好、稳定，在应用上更具普遍性。

3) 就模型中涝渍指标之间的比较而言，按时间划分的涝渍分离指标 (SEW_{30} 、 $SWFDH$) 在静态模型中的预测精度最高（相关系数最高，相对误差最小），在修正 Morgan 模型的预测中也达到了较高显著性，但相关系数较低，相对误差较大。按空间划分的涝渍分离指标 (SEW_{30} 、 SFW) 在两类模型预测中精度均较高，但均出现 SFW 系数为正值的问题（统计模型中此项系数应为负值，表示产量与涝害指标呈负相关关系），尤其在静态模型中出现的正值，与实际规律相悖。此前，在多种静态模型的建立中，已发现该指标会出现正值异常^[3,12]，可能是由于试验设计的受涝时间短，淹水深度浅导致受涝处理只起到灌溉作用，也可能是由于处理组设置过少，数据拟合时自由度过小，最终导致数据异常现象。涝渍综合指标 $SFEW_{30}$ 作为模型选用指

标时预测结果最稳定，且指标系数少，方便应用，故推荐采用此指标建立修正的 Morgan 模型。

4) 对比表 5、表 6 和图 2、图 4 可以看出，按空间划分的涝渍分离指标 (SEW_{30} 、 SFW) 在 Morgan 模型中的预测效果优于按时间划分的涝渍分离指标 (SEW_{30} 、 $SWFDH$)，而在静态模型中看不出二者的差别。因此，在应用 Morgan 模型分析涝和渍胁迫的单独影响时，推荐使用按空间划分的涝渍分离指标。

6 结 论

本文以 2008—2011 年的棉花涝渍胁迫试验资料为依据，进行了涝渍胁迫指标的统计和分析，并对 Morgan 模型用于涝渍胁迫条件下的作物生长和产量模拟进行了修正，结果表明修正的 Morgan 模型具有良好的适用性。通过比较分析，可得出以下结论：

1) 通过以适宜的涝渍指标替换水分亏缺条件下 Morgan 模型中的土壤水分状况指标建立起修正模型被证明是可行的，该模型能较为准确地预测不同年份作物的干物质最终产量。

2) 本文所选用的 3 种涝渍指标均可用于构建修正 Morgan 模型，模型预测结果的显著性水平均达到 0.05 及以上，大部分预测结果的显著性水平为 0.001，且平均相对误差基本上小于 20%。最终预测效果表明，以涝渍综合指标 $SFEW_{30}$ 与按空间划分的涝渍分离指标 (SEW_{30} 、 SFW) 构建的修正 Morgan 模型在 2008、2011 两年内的产量预测平均相对误差均控制在 20% 以内，预测产量与实际产量也具备良好的相关性（显著性水平 $\alpha=0.001$ ），由此说明这两种模型预测结果更加准确，模型在年际之间的稳定型好。其中以涝渍综合指标 $SFEW_{30}$ 构建的修正 Morgan 模型所需参数少，应用更为方便。而按空间划分的涝渍分离指标 (SEW_{30} 、 SFW) 构建的修正 Morgan 模型可用于分析涝和渍两种胁迫对作物的单独影响。

3) 修正 Morgan 与静态统计模型相比, 虽然所需率定的参数多, 计算过程复杂, 但模型参数的稳定性好、预测精度高, 且能模拟作物干物质累积过程。

需要说明是, 由于试验条件的限制, 本文仅在同一地点不同年际之间开展了研究, 其结果是否适合其他地区还有待进一步的试验验证。此外, 模型中涝渍胁迫指标 SFW 的系数为正, 说明模型适用于一定的涝渍胁迫范围, 超过该范围, 模型并不适用。

[参 考 文 献]

- [1] Sairam R K, Kumutha D, Ezhilmathi K, et al. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants[J]. *Biologia Plantarum*, 2008, 52(3): 401—412.
- [2] Siben W H. Het verband tussen ontwatering en ontwatering en opbrengst bij de jonge zavelgrond in de Noordoostpolder[M]. Jaar van uitgave, 1964.
- [3] 程伦国, 王修贵, 朱建强. 多过程连续涝渍胁迫对棉花产量的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2006(8): 59—61. Cheng Lunguo, Wang Xiugui, Zhu Jianqiang, et al. Influences of multi-stage successive water logging on cotton yield[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2006(8): 59—61. (in Chinese with English abstract)
- [4] 朱建强, 欧光华, 张文英, 等. 棉花花铃期涝渍相随对棉花产量的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 80—83. Zhu Jianqiang, Ou Guanghua, Zhang Wenying, et al. Experimental research on effect of surface and subsurface waterlogging in stage of cotton flowering and boll set on yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(4): 80—83. (in Chinese with English abstract)
- [5] Evans R O, Skaggs R W. Stress day index model to predict corn and soybean yield response to water table management[C]// *Transactions of the Workshop on Subface Drainage Simulation Models. 15th Congress on Irrigation and Drainage*, 1993, 210—234.
- [6] 汤广民. 以涝渍连续抑制天数为指标的排水标准试验研究[J]. *水利学报*, 1999(4): 25—29. Tang Guangming. Experimental study on drainage standard[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999(4): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [7] 邵光成, 俞双恩, 刘娜, 等. 以涝渍连续抑制天数为冬小麦排水指标的试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 56—60. Shao Guangcheng, Yu Shuang'en, Liuna, et al. Study on continuous days of water logging and excessive soil water as drainage index of wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(8): 56—60. (in Chinese with English abstract)
- [8] 沈荣开, 王修贵, 张瑜芳. 涝渍兼治农田排水标准的研究[J]. *水利学报*, 1999(3): 71—74. Shen Rongkai, Wang Xiugui, Zhang Yufang, et al. Research on the criteria of combined controlling of surface and subsurface waterlogging[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999(3): 71—74. (in Chinese with English abstract)
- [9] 朱建强, 乔文军. 涝渍连续过程以时间为尺度的作物排水控制指标研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(5): 67—71. Zhu Jianqiang, Qiao Wenjun. Research upon dominated quota of crop land drainage with time-scaled under continuous water-logging[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(5): 67—71. (in Chinese with English abstract)
- [10] 莫春华. 涝渍胁迫对作物生长及产量的影响[D]. 武汉: 武汉大学, 2009. Mo Chunhua. The Impacts of Waterlogging Stress on Crop Growth and Yield[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [11] 吴琳. 作物对涝渍胁迫响应规律的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010. Wu Lin. The Research on Crop Response to Waterlogging[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [12] 曹光. 涝渍胁迫对棉花生产及产量的影响研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012. Cao Guang. The Effect of Waterlogging Stress on Cotton Growth and Yield[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [13] Hanway J J. How a corn plant develops[M]. *Extension bulletin, IowaState Univ*, June 1971.
- [14] Morgan T H. A dynamic model of corn yield response to water[J]. *Water Resources Research*, 1980(6): 59—64.
- [15] 迟道才, 王瑄, 夏桂敏, 等. 北方水稻动态水分生产函数研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(3): 30—34. Chi Daocai, Wang Xuan, Xia Guimin, et al. Dynamic water production functions for rice in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 20(3): 30—34. (in Chinese with English abstract)
- [16] 沈荣开, 黄冠华, 张瑜芳. 夏玉米水分生产函数动态产量模型的研究[R]. 武昌: 武汉水利电力大学, 1999. Shen Rongkai, Huang Guanhua, Zhang Yufang. The Study of the Model of Dynamic Production Function for Summer Corn[R]. Wuchang: Wuhan University of

- Hydraulic and Electric Engineering, 1999. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王修贵, 沈荣开, 王友贞, 等. 受渍条件下作物水分生产函数的田间试验研究[J]. 水利学报, 1999(8): 40—44.
Wang Xiugui, Shen Rongkai, Wang Youzhen, et al. Experimental study on water production function for subsurface drainage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(8): 40—44. (in Chinese with English abstract)
- [18] 朱建强, 欧光华, 张文英, 等. 涝渍相随对棉花产量与品质的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(9): 1050—1056.
Zhu Jianqiang, Ou Guanghua, Zhang Wenyong, et al. Influence of subsurface waterlogging followed by surface waterlogging on yield and quality of cotton[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(9): 1050—1056. (in Chinese with English abstract)

Experimental study on Morgan model under waterlogging stress

Qian Long, Wang Xiugui, Luo Wenbing, Wu Lin

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The crop water production function under waterlogging stress is of significance both for the benefit evaluation of disaster reduction and the decision making of waterlogging disaster control. Crop water production functions can be categorized into two kinds: dynamic model and static model. Since the dynamic models were based on a certain crop physiology basis, it can be used to simulate the process of crop growth. However, the dynamic models under waterlogging were rarely found in publications. Based on the Morgan model, which was originally used for crop yield simulation under water deficit, this paper established a revised Morgan model for waterlogging stress by replacing the soil moisture index with waterlogging indexes. The waterlogging indexes widely used in practice were subsurface-surface separated index (SEW_{30} , SFW) and composite index $SFEW_{30}$. But the former had a problem that the weight of surface waterlogging index was too small compared with subsurface waterlogging index. To balance the weight of subsurface and surface waterlogging indexes, the separated indexes were divided by time such as (SEW_{30} , $SWFDH$) and space such as (SEW_{30} , SFW) respectively. All the three different waterlogging indexes i.e. (SEW_{30} , SFW), (SEW_{30} , $SWFDH$), $SFEW_{30}$ were used to revise the Morgan model in order to obtain the most suitable index. Waterlogging experiments on cotton were carried out in 22 lysimeters at Irrigation and Drainage Comprehensive Experimental Station in Wuhan University from 2008 to 2011. Dry matter yield samples were taken every 10 days, and the dynamic change of groundwater table was monitored every day during the period of waterlogging. Data in 2009 and 2010 were used to calibrate parameters and the data in 2008 and 2011 were used to validate the revised Morgan model. Results showed that the cotton dry matter yields predicted by the revised Morgan model adopting three different indexes all coincided with the observed yields well, especially the indexes (SEW_{30} , SFW) and ($SFEW_{30}$). The corresponding revised Morgan model adopting the two indexes both achieved a high significance level of 0.001 in both 2008 and 2011 with a smaller relative error of less than 20%, which showed that, the revised Morgan model was effective and practicable for cotton dry matter yields simulation under waterlogging stress. Considering the less amount of parameters in model and precision, the composite index ($SFEW_{30}$) was recommended to adopt in the revised Morgan model preferentially, but only by adopting the index (SEW_{30} , SFW), the effect of subsurface and surface waterlogging on dry matter yields can be analyzed respectively. In order to make a comparison between the revised Morgan model and the static model, both of them were calibrated and validated with the same data obtained from the waterlogging experiments, and the simulated yields of both of the two models were compared with the observed yields. Results showed that the prediction of the revised Morgan model both an acceptable significant level of 0.05 in 2011 and a relative small relative error of less than 20% in 2008 while the static model failed to achieve these error indexes, which indicated that the revised Morgan model had a better stability than the static model in different years.

Key words: stresses, dynamic, models, waterlogging, crop water production function, Morgan model

(责任编辑: 曾懿婷)