

马红军,张玲丽,李文甲. 不同水肥处理下温室番茄干物质积累动态模型[J]. 江苏农业科学,2016,44(8):254-257.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.08.073

不同水肥处理下温室番茄干物质积累动态模型

马红军¹, 张玲丽¹, 李文甲²

(1. 银川能源学院生物工程系, 宁夏永宁 750105; 2. 宁夏农业学校, 宁夏银川 750021)

摘要:以灌溉上限和施肥量为因素,采用二元二次通用旋转组合设计,建立基于水肥和辐射积影响下的番茄叶面积指数模型及单叶光合速率模型,并根据建立的番茄叶面积指数模型和单叶光合速率模型,利用高斯积分法模拟水肥因子影响下的番茄干物质积累模型。结果表明:模型对不同水肥处理下的番茄干物质积累预测效果较好,模型对番茄干物质预测结果与 1:1 直线间的 r^2 、 $RMSE$ 、 RE 分别为 0.908 3、373.30 kg/hm²、14.81%。该模型能较好地预测土壤水肥因子对番茄干物质积累的影响。

关键词:温室番茄;水肥耦合;叶面积指数;单叶光合速率;高斯积分法;干物质积累

中图分类号: S641.206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)08-0254-03

干物质积累模型的模拟对于作物生长发育、光合生成和产量形成等过程研究具有重要意义;同时,对于提高番茄产量、增加番茄经济收益具有重要指导作用。前人对于作物干物质的积累进行了大量的研究,周青云等以时间为尺度建立小麦干物质积累经验模型^[1];王新等采用高斯积分法计算每日冠层的光合作用速率,并用每日冠层的总光合量减去呼吸作用消耗量得到每日的干物质增长量^[2]。众所周知,干物质积累既受光辐射及生长度日等影响,同时又受到水肥管理措施的影响。在番茄生长发育过程中,水和肥能够影响作物的形态、叶片光合速率^[3-4],进而影响作物的产量、品质等^[5-6]。目前,国内学者报道了有关水肥耦合对作物生理指标的影响^[5,7],或者建立了番茄^[8]、小麦^[9]、水稻^[10]等干物质积累模型。但是,关于兼顾水肥影响因子的番茄干物质积累模型鲜有报道。本试验在前人研究基础上,模拟水肥对于番茄叶面积指数及单叶光合速率的影响,并且建立不同水肥条件下的番茄干物质积累模型,为指导番茄水肥管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试番茄品种为金鹏 1 号,于 2014 年 3 月 9 日定植,行距 35 cm,株距 80 cm;当年 7 月 15 日拉秧。试验以土壤水分和施肥量为因素,采用二元(1/2 实施)二次正交旋转组合设计,各处理因素水平编码见表 1。共设 13 个小区,小区面积 8.4 m²,随机区组排列,2 次重复。各处理灌溉下限均为 50%,当土壤相对质量含水量降至土壤灌溉下限时,灌水补充到试验设计的土壤水分灌溉上限。施肥采用 N:P₂O₅:K₂O=2:1:2 的比例,除磷肥全部作基肥一次性施入外,氮肥和钾肥分 4 次等量施入。为防止相邻小区水分及养分互相影响,

各小区之间深埋 50 cm 的薄膜隔离,并在两头设保护行。

表 1 番茄水肥试验各处理编码组合及对应灌溉上限和施肥量

处理	编码组合 (x_1, x_2)	灌溉上限 (%)	施肥量(kg/hm ²) (N:P ₂ O ₅ :K ₂ O)
T1	(1.414, 0)	100	375:187:375
T2	(1, 1)	94	550:275:550
T3	(1, -1)	94	200:100:200
T4	(0, -1.414)	80	125:63:125
T5	(0, 1.414)	80	625:313:625
T6	(0, 0)	80	375:187:375
T7	(-1, 1)	66	550:275:550
T8	(-1, -1)	66	125:63:125
T9	(-1.414, 0)	60	375:187:37

注: x_1 为灌水上限对应编码, x_2 为施肥量对应编码。

1.2 试验方法

1.3 指标测定及数据处理

1.3.1 气象数据监测 采用物格环境记录仪观测室内空气温度、光合有效辐射 PAR,仪器设定为每 0.5 h 记录 1 次。

1.3.2 叶面积、干物质量测定 从 3 月 27 日起,每隔 7~10 d 各处理选取 4~6 株植株进行破坏性取样,共取样 6 次。采用剪纸法^[11]测量叶片面积,并测量剪取叶片的长(l)、宽(w),与剪纸法所测实际叶面积(LA)回归得叶片面积模型:

$$LA = 0.495(l \cdot w)^{0.911}; \quad (1)$$

用测量的番茄单株总叶面积乘以栽培密度得到叶面积指数:

$$LAI = LA \times d/10^6. \quad (2)$$

式中: LA 为单株总叶面积,mm²; l 为叶长,mm; w 为叶宽,mm; LAI 为叶面积指数; d 为栽培密度,株/m²。

1.3.3 干物质量测定 试验样品在进行叶面积测量之后,放入烘箱于 105℃ 杀青 15 min,而后于 72℃ 干燥至恒质量,称质量得出不同处理各时间段的单株番茄的平均干物质的量 D (g/株),则单位面积番茄干物质的量为 $D \cdot d \cdot 10$ (kg/hm²)。

1.3.4 土壤相对质量含水量测量 利用 TDR 水分测量仪,测量土壤水分相对体积含水量并转化成相对质量含水量。每

收稿日期:2016-03-01

基金项目:2014 年银川能源学院教学质量工程(编号:银能院发[2014]155 号)。

作者简介:马红军(1981—),男,宁夏平罗人,硕士,讲师,主要从事植物学教学及植物栽培技术研究。E-mail:mahj1118@163.com。

次测量随机选取 5 个测试点,取其平均值为当时相对质量含水量。每次灌水量可用公式(3)计算:

$$V = r_s \times S \times h \times Q \times (q_1 - q_2) \times \eta。 \quad (3)$$

式中: V 为灌水量, L ; r_s 为土壤容重, g/cm^3 ; S 为小区面积, m^2 ; h 为计划湿润层深度, cm ,在营养生长和开花坐果前期,计划层深度为 20 cm ; Q 为田间持水量(质量含水量); q_1 、 q_2 分别为土壤水分上限、下限,以田间持水量的百分比表示,%; η 为灌溉效率,取 100%。

1.3.5 单叶光合速率的测定 使用 LI-6400 型光合仪(LI-6400, LI-COR 生物科学公司)于 6 月 2 日上午测定各处理瞬时光合速率。光合仪测量采用开放气路,选择 LED 光源且光量子通量密度(photon flux density, PFD)设定为 800 $\mu mol/(m^2 \cdot s)$,叶室温度控制在 25 $^{\circ}C$ 。测量时每个处理选 3 株,每株选取自顶端至基部第 3~5 张真叶进行测量。

1.4 模型验证

采用检验模型时常用的回归估计标准误差 $RMSE$ 和相对误差 RE 对模拟值与实测值之间的符合度进行分析^[12]。 $RMSE$ 、 RE 可分别用公式(4)、(5)计算:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}}; \quad (4)$$

$$RE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n OBS_i} \times 100\%。 \quad (5)$$

式中: OBS_i 为实测值,本研究中为实测的番茄株高(mm)、单株展开叶数(张)和单叶面积(mm^2); SIM_i 为模拟值,本研究中为预测的番茄株高(mm)、单株展开叶数(张)和单叶面积(mm^2); n 为样本容量。 $RMSE$ 值越小,表明模拟值与观测值间的偏差越小,模型的预测精度越高。

2 模型建立

2.1 叶面积指数模拟

叶片是进行光合作用的主要器官,叶面积的大小影响作物干物质的同化速率,最终决定作物总干物质积累量。本研究采用辐射热法^[13]模拟番茄叶面积指数变化,公式如下:

$$LAI = c_1 \exp[c_2 TEP] + LAI_0。 \quad (6)$$

式中: LAI_0 为初始叶面积指数,本试验中取 0.098; TEP 为辐射热积。

2.2 单叶光合速率模拟

土壤灌水和施肥不当会引起番茄光合速率的降低,假定由土壤水分和施肥量引起的光合速率限制系数为 $\theta_{(w,f)}$,相应公式如下:

$$\theta_{(w,f)} = \frac{FG_{(w,f)} - FG_0}{FG - FG_0}; \quad (7)$$

$$FG = PLMX \times [1 - \exp(-\varepsilon \times PAR/PLMX)]; \quad (8)$$

$$FG_0 = PLMX_0 \times [1 - \exp(-\varepsilon \times PAR/PLMX_0)]。 \quad (9)$$

式中: $\theta_{(w,f)}$ 为土壤水肥光合速率限制系数; $FG_{(w,f)}$ 为不同水肥处理下叶片瞬时光合速率, $\mu mol/(m^2 \cdot s)$; FG 为水肥适宜单叶光合速率, $kg/(hm^2 \cdot h)$; $PLMX$ 为单叶最大光合速率, $kg/(hm^2 \cdot h)$,在本模型中取 37 $kg/(hm^2 \cdot h)$; FG_0 为土壤水分趋近灌溉下限且施肥量趋近 0 时的单叶光合速率,

$\mu mol/(m^2 \cdot s)$; $PLMX_0$ 为水肥趋近 0 时为单叶最大光合速率, $kg/(hm^2 \cdot h)$,根据试验测量取值为 18.5 $kg/(hm^2 \cdot h)$; ε 为光转换因子,即吸收光的初始光能利用率,本模型中取 0.45 $kg/(hm^2 \cdot h) [(m^2 \cdot s)]$; PAR 为光合有效辐射, $J/(m^2 \cdot s)$ 。

则由公式(7)(8)(9)可得不同土壤水肥影响下的单叶光合速率模型:

$$FG_{(w,f)} = \theta_{(w,f)} \cdot (FG - FG_0) + FG_0。 \quad (10)$$

2.3 干物质积累模型

2.3.1 冠层光合作用 每日冠层的光合速率采用高斯积分法^[14]来计算。高斯积分法是将叶片冠层分为 3 层,将每层瞬时同化速率加权求和得出整个冠层的瞬时同化速率,在此基础上再计算每日的冠层光合速率。具体计算公式如下:

$$LGUSS(i) = DIS(i) \times LAI(i=1,2,3); \quad (11)$$

$$IL(i) = PAR \times k \times \exp[-k \times LGUSS(i)] (i=1,2,3); \quad (12)$$

$$FGL(i) = PLMX \times \{1 - \exp[-\varepsilon \times IL(i)/PLMX]\} (i=1,2,3); \quad (13)$$

依据式(10)关于水肥对于单叶光合速率的影响,对式(13)修正得:

$$FGL(i)_{(w,f)} = \theta_{(w,f)} \cdot [FGL(i) - FGL(i)_0] + FGL(i)_0 (i=1,2,3); \quad (14)$$

$$TFG = \sum [FGL(i)_{(w,f)} \times WT(i)] \times LAI(i=1,2,3); \quad (15)$$

$$DTGA = \sum [TFG(i) \times WT(i) \times DL] (i=1,2,3)。 \quad (16)$$

式中: $LGUSS(i)$ 为冠层顶部至深度 i 处所累积的叶面积指数; $DIS(i)$ 为高斯三点积分法的距离系数,其值见表 2; $IL(i)$ 为冠层中第 i 层所吸收的光合有效辐射量, $J/(m^2 \cdot s)$; k 为冠层消光系数,对番茄冠层其取值为 0.8^[11]; $FGL(i)$ 为冠层中第 i 层的瞬时光合速率, $kg/(hm^2 \cdot h)$; TFG 为整个冠层的瞬时光合速率, $kg/(hm^2 \cdot h)$; $WT(i)$ 为高斯三点积分法积分的权重,其值见表 2; $DTGA$ 为每日冠层的总光合量, $kg/(hm^2 \cdot h)$; $TFG(i)$ 为整个冠层 i 时刻的瞬时光合速率, $kg/(hm^2 \cdot h)$; DL 为日长, h 。

每日番茄冠层总的光合量为各小时冠层瞬时光合速率之和,如下所示:

$$DTGA = \sum [TFG(t)] (t=1,2,3,\dots,24)。 \quad (17)$$

式中: $TFG(t)$ 为 t 时刻冠层的瞬时光合速率, $kg/(hm^2 \cdot h)$ 。

表 2 高斯积分三点法的权重值(T)和距离系数(DIS)

i	$WT(i)$	$DIS(i)$
1	0.2777 78	0.112 702
2	0.444 444	0.500 000
3	0.277 778	0.887 298

2.3.2 呼吸作用 在作物生长模拟模型中,呼吸作用分为维持呼吸和生长呼吸。维持呼吸指活的有机体维持其现有的生化和生理状态所消耗的能量。维持呼吸与作物本身的生物量和温度有关,可用下式计算:

$$RM = R_{m,25} \times W \times Q_{10}^{TL-25/10}。 \quad (18)$$

式中: RM 为维持呼吸消耗, $kg/(hm^2 \cdot d)$; $R_{m,25}$ 为 25 $^{\circ}C$ 时番茄的维持呼吸消耗, $[kg/(kg \cdot d)]$,在本模型中取值为 0.015 $kg/(kg \cdot d)$; W 为番茄干质量, kg/hm^2 ; TL 为叶片温度, $^{\circ}C$,一般可用气温代替; Q_{10} 取值为 2,表示温度每升高

10 ℃,维持呼吸增加 1 倍。

生长呼吸指作物在有机质合成、植物体增长以及新陈代谢活动中消耗的能量,也就是光合产物由 CO₂ 转化为 CH₂O 过程中所消耗的光合产物,在干物质增长速率的计算公式中考虑。生长呼吸与植物的有机物质合成、植株体生长以及新陈代谢活动有关,依赖于植株的光合速率,对温度不敏感。相关公式如下:

$$RG = R_g \times FDTGA。 \tag{19}$$

式中:RG 为生长呼吸消耗量(以 CO₂ 计),kg/(hm²·d);R_g 为生长呼吸系数,取 0.39;FDTGA 为当天的光合同化量(以 CO₂ 计),kg/(hm²·d)。

2.3.3 干物质生产 干物质增长速率的计算公式:

$$\Delta W = (\frac{30}{44} \times DTGA - RM - R_g) / G。 \tag{20}$$

式中:ΔW 为干物质增长速率,kg/(hm²·d);DTGA 为冠层的日总光合量,kg/(hm²·d);G 为每生产 1 kg 干物质所需的葡萄糖(CH₂O)量,取 1.45 kg/kg;30/44 为将 CO₂ 转换成 CH₂O 的分子量的比值。由初始干物质质量与每天的干物质增长速率,可计算任意 1 d 的总干物质质量 BIOMASS[kg/(hm²·d)]:

$$BIOMASS(I + 1) = BIOMASS(I) + \Delta W。 \tag{21}$$

3 参数确定与模型检验

3.1 模型参数的确定

3.1.1 叶面积指数模型 根据本试验 1 测量的温度和光辐射强度计算辐热积,得到不同水肥处理的叶面积指数随辐热积变化如图 1 所示。利用 DPS 7.0 模型构建软件确定模型参数,计算出各处理下的参数 c₁、c₂ 值,并进行二次通用旋转设计分析,在 α=0.10 显著水平剔除不显著项后的结果:c₁=0.093 15;c₂=0.064 02-0.002 19x₂-0.002 48x₁²。

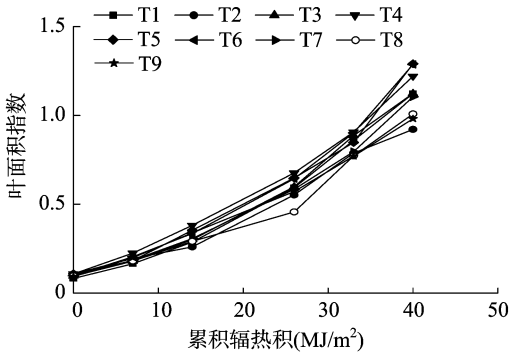


图1 不同水肥处理下番茄叶面积指数随辐热积变化

3.1.2 单叶光合速率模型 依据本试验测得单叶光合速率,并结合式(7)计算出水肥影响下的光合速率限制系数 θ_(w,f),结果如表 3 所示。以灌水上限编码值和施肥量编码值为自变量、θ_(w,f) 为目标函数,在 α=0.10 显著水平剔除不显著项后,简化后的回归方程:

$$\theta_{(w,f)} = 1 - 0.403\ 54x_1^2 - 0.178\ 76x_2^2。$$

式中:x₁ 为灌水上限编码值;x₂ 为土壤施肥量编码值。

3.2 干物质积累模型检验

利用本研究中相关气象资料,根据式(3)~(6)计算出番茄出苗后至成熟期任意1d的LAI,进一步模拟出验证时间的

表3 不同处理瞬时光合速率分析

处理	瞬时光合速率 P [μmol/(m ² ·s)]	水肥限制系数 F _(w,f)
T1	20.16	0.32
T2	24.92	0.159
T3	23.36	0.212
T4	29.64	0.000
T5	23.19	0.117
T6	26.21	0.15
T7	23.72	0.200
T8	21.75	0.266
T9	17.58	0.407

干物质积累量。与本研究测得的干物质积累量进行比较,结果如图 2 所示。本模型对于干物质积累量预测结果与 1:1 直线间的 r²、RMSE、RE 分别为 0.908 3、373.30 kg/hm²、14.81%。

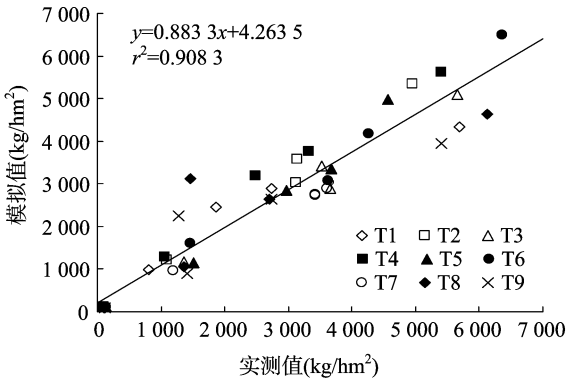


图2 不同水肥条件下番茄干物质积累量观测值与模拟值的比较

4 讨论结论

干物质积累是作物产量形成的基础,定量分析作物生产过程中干物质积累的动态变化是揭示作物产量形成和掌握高产群体调控指标的重要内容。本模型利用辐热积建立番茄营养生长期叶面积指数动态模型,建立水肥影响下的番茄单叶光合速率限制系数,同时引用高斯积分法,并结合水肥因子对冠层光合速率的影响,计算冠层的日总同化量。不仅考虑了温度、光辐射等环境因子影响,模型还考虑了土壤水肥环境对于干物质积累的影响。所以本模型对于番茄实际生产更具有指导意义。由试验结果可看出,本试验建立的兼顾水肥影响的番茄干物质积累模型模拟结果与实际测量干物质质量结果基本吻合,试验模型经过检验,对于干物质积累量预测结果与 1:1 直线间的 r²、RMSE、RE 分别为 0.908 3、373.30 kg/hm²、14.81%。说明本模型具有较好的精确度和实用性。本研究 RE 为 14.81% 的主要原因在于试验栽培管理上包括水肥控制及植株管理误差,虽然试验按照设计标准进行,但仍会存在试验仪器精度及其他不可控因素带来的试验误差。

本模型主要针对营养生长期番茄干物质积累,因为营养生长期番茄仅进行营养生长,对于土壤水肥要求稳定。而对于开花坐果期和盛果期,番茄对于营养的吸收及干物质的分配发生很大变化^[15],番茄需水量和需肥量比营养生长期明显提高;另外,开花坐果期和盛果期番茄单叶最大光合速率较营

王爱霞,方炎明. NaCl胁迫对不同种源构树种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(8):257-261.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.08.074

NaCl胁迫对不同种源构树种子萌发及幼苗生长的影响

王爱霞^{1,2}, 方炎明²

(1. 内蒙古工业大学建筑学院, 内蒙古呼和浩特 010050; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏南京 210037)

摘要:选择浙江、江苏连云港、福建3个不同种源的构树(*Broussonetia papyrifera*)种子为试验材料,分析不同浓度盐分胁迫下构树种子的发芽率、发芽指数、活力指数,比较光照、黑暗条件下3个种源构树种子的萌发差异,同时研究了构树种子幼苗的生理特征。研究表明,除浙江种源不萌发外,光照对江苏连云港、福建种源构树种子萌发有明显的促进作用,但对胚根生长有限制作用;低浓度盐碱处理能促进构树种子萌发,发芽率升高;而高盐处理则抑制构树种子萌发,发芽率、发芽指数、活力指数下降,且构树种子的发芽率、发芽指数、活力指数因种源不同而有差异,江苏连云港种源最高,福建种源次之,浙江种源不萌发;在盐分胁迫下,构树种子幼苗的SOD活性呈先降后升趋势;MDA含量随处理浓度的升高而增加;构树种子幼苗的可溶性蛋白含量和游离脯氨酸含量均呈上升趋势,盐浓度为75 mmol/L时,含量达到最高,在100 mmol/L时可溶性蛋白含量下降,而游离脯氨酸含量没有明显变化。综合分析,连云港构树种子在盐处理条件下发芽率较高,抗逆性较强,可作为改善盐碱地的绿化树种。

关键词:构树;盐分胁迫;萌发;生理特征;种源地

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)08-0257-05

全世界约有1/3的盐渍化土壤,严重制约着农业生产,是影响生态环境的重要因素之一。中国有250万hm²以上的各种盐渍土壤,而且还有逐年上升的趋势,因此植物耐盐机理和耐盐作物品种的培育已成为当前的研究热点之一。

收稿日期:2016-02-29

基金项目:内蒙古工业大学博士研究项目(编号:117-841011);国家林业科技支撑计划专题(编号:2006BAD03A1702)。

作者简介:王爱霞(1979—),女,内蒙古呼和浩特人,博士,讲师,主要从事环境生物学研究。E-mail:690236482@qq.com。

养生长期增大^[16]。因此对于土壤水肥影响下番茄开花坐果期和盛果期干物质积累的模拟,需进一步试验得出。

参考文献:

- [1]周青云,王仰仁,叶澜涛,等.不同水肥处理下冬小麦干物质积累动态及模型研究[J].麦类作物学报,2013,33(3):555-560.
- [2]王新,刁明,马富裕,等.滴灌加工番茄叶面积、干物质生产与积累模拟模型[J].农业机械学报,2014,45(2):161-168.
- [3]冯淑梅,张忠学.滴灌条件下水肥耦合对大豆生长及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报,2011,30(4):65-67,75.
- [4]贾彪,钱瑾,马富裕.氮素对膜下滴灌栽培棉花叶面积指数影响的模拟研究[J].农业机械学报,2015,46(2):79-87.
- [5]杨小振,张显,马建祥,等.滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J].农业工程学报,2014,30(7):109-118.
- [6]石珊珊,周苏玫,尹钧,等.高产水平下水肥耦合对小麦旗叶光合特性及产量的影响[J].麦类作物学报,2013,33(3):549-554.
- [7]李严坤,张忠学,仲爽,等.水肥处理对玉米叶片水分利用效率及其光合特性的影响[J].东北农业大学学报,2008,39(10):15-19.

植物的耐盐性是由多基因决定的数量性状,是多种耐盐性状的综合体现。人们一直尝试通过多种方法培育耐盐作物,近几年来,随着植物抗渗透胁迫基因工程的迅速发展,新的耐盐相关基因不断被发现,但由于对植物耐盐机理的了解还不够深入,到目前为止尚未培育出一种能在盐碱地上高产的作物品种。构树(*Broussonetia papyrifera*)是桑科(Moraceae)构属的乔木树种,构树适应能力较强,耐干旱瘠薄,能忍受大气污染,是一个颇具发展前途的优良速生经济树种和新炭树种,构树在水土保持、涵养水源、抗污吸污、造纸、木炭等方面均具有重要意义。目前,关于构树种子的耐盐研究主要集

- [8]徐刚,张昌伟,李德翠,等.温室番茄光合生产和干物质积累模型的建立[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2007,28(3):171-176.
- [9]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.
- [10]李艳大,汤亮,陈青春,等.水稻地上部干物质积累动态的定量模拟[J].应用生态学报,2010,21(6):1504-1510.
- [11]李永秀,罗卫红,倪纪恒,等.基于辐射和温度热效应的温室水果黄瓜叶面积模型[J].植物生态学报,2006,30(5):861-867.
- [12]倪纪恒,毛罕平.电导率对温室黄瓜叶面积和干物质生产影响的动态模拟[J].农业工程学报,2011,27(12):105-109.
- [13]李永秀,罗卫红,倪纪恒,等.基于辐射和温度热效应的温室水果黄瓜叶面积模型[J].植物生态学报,2006,30(5):861-867.
- [14]李娟,郭世荣,罗卫红.温室黄瓜光合生产与干物质积累模拟模型[J].农业工程学报,2003,19(4):241-244.
- [15]邢英英,张富仓,张燕,等.膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J].农业工程学报,2014,30(21):70-80.
- [16]李百凤,冯浩,吴普特,等.土壤水分下限对番茄光合速率、品质及产量的影响[J].中国农学通报,2007,23(5):471-476.