

引文格式: 陈晨, 张刘东, 倪匡迪. 基于 Logistic 模型的覆膜种植辣椒株高、果实生长及产量模拟[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(6): 1049–1058. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202204010](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202204010)

基于 Logistic 模型的覆膜种植辣椒株高、果实生长及产量模拟*

陈 晨, 张刘东**, 倪匡迪
(云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 【目的】研究昆明地区不同地膜覆盖方式下辣椒株高及果实生长发育与坐果时间的关系, 建立产量预测模型, 为区域辣椒覆膜种植提供技术参考。【方法】2020—2021 年开展 2 轮辣椒垄作覆膜种植试验, 分析不同覆膜方式和不同颜色地膜覆盖对辣椒株高、果实鲜质量以及果实纵、横径的影响, 构建植株株高以及果实生长发育 Logistic 模型, 通过实测值验证模型的模拟精度, 并使用 Logistic 模型预测不同覆膜方式处理下辣椒的最高产量。【结果】除对膜下种植处理株高的决定系数 (R^2) < 0.88、均方根误差 (RMSE) > 20% 以及对无膜种植处理果实横径的 R^2 < 0.70、RMSE > 20% 外, 建立的模型对模拟辣椒植株生长、果实纵径和横径随坐果时间的生长以及对辣椒产量的预测具有较高的精度。【结论】本研究所建立的模型能够较好地模拟昆明地区不同覆膜方式处理下辣椒植株高度和果实生长随生育时间的变化过程。

关键词: Logistic 模型; 辣椒; 株高; 生长发育; 产量

中图分类号: S641.301

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2023) 06-1049-10

Simulation of Plant Height, Fruit Growth and Yield of Pepper under Different Film Mulching Conditions Based on Logistic Model

CHEN Chen, ZHANG Liudong, NI Kuangdi

(College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To study the relationship among pepper plant height, fruit growth and fruit setting time under different plastic film mulching methods in Kunming area, and to establish a pepper yield prediction model, providing technical guidance for pepper film mulch planting. [Methods] From 2020 to 2021, mulching film planting experiments were carried out to analyze the effects of different mulching methods and mulching colors on the pepper plant height, fruit fresh weight and fruit diameter. The experimental results of plant height and fruit growth was used to verify the simulation accuracy of Logistic model, and the model was used to predict the highest yield of pepper under different treatments. [Results] Except for the coefficient of determination (R^2) < 0.88 for plant height under film-mulching planting treatment, the root mean square error (RMSE) > 20%, and the R^2 < 0.70 and

收稿日期: 2022-04-06

修回日期: 2023-11-29

网络首发日期: 2024-01-11

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51669035); 云南省高层次人才支持计划青年拔尖人才项目 (YN-WR-QNBJ-2020-168); 云南省农业联合专项 (202301BD070001-099)。

作者简介: 陈晨 (1996—), 男, 重庆铜梁人, 在读硕士研究生, 主要从事农业水土资源研究。

E-mail: 1579642867@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 张刘东 (1980—), 男, 山西晋城人, 博士, 教授, 主要从事农业水土资源与环境研究。E-mail: zld8066@163.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20240110.1446.001>



RMSE>20% for transverse diameter of fruit under non film-mulching planting treatment, the established model had high accuracy for simulating pepper plant growth, pepper fruit longitudinal and transverse diameters with fruit setting time, and prediction of pepper yield. [Conclusion] The established model can well simulate the development of pepper plant height and fruit growth with physiological time under different mulching methods in Kunming area.

Keywords: Logistic model; pepper; plant height; growth and development; yield

辣椒原产中南美洲, 属茄科 (Solanaceae) 一年或有限多年生草本植物, 是一种对土壤环境适应性强、易栽培、投入低、产量高和效益好的经济作物, 在中国各地广泛种植, 因其独特的味道和丰富的维生素含量而深受国民喜爱。2020 年, 中国辣椒种植面积 81.4 万 hm^2 , 产量 1 960 万 t, 云南省是中国干制辣椒最大的生产区, 年产量约为 17 万 t^[1-3]。昆明市地处云贵高原中部, 干湿分明, 土壤铁和铝的氧化物较丰富, 故土壤颜色呈红色^[4-5], 通过改善土壤肥力或改变种植方式等可以提高土壤种植的利用效率, 增加作物产量^[6-7]。地膜具有保墒增温的作用, 自引进中国后得到了长足的发展^[8]。作物在地膜的保护下可以提高肥料利用率、控制杂草生长, 为农作物生长创造适宜的生态环境^[9]。辣椒株高以及果实纵径和横径是评价其生长和品质的重要指标, 主要用于衡量其产量和品质, 建立不同覆膜条件下辣椒株高、果实纵径与横径的生长模拟模型, 对预测和提高不同种植方式的产量具有重要意义。

Logistic 函数又称 Logistic 回归分析, 是由皮埃尔·弗朗索瓦·韦吕勒命名的一种常见的 S 形函数, 广泛用于模拟生物种群数量^[10-11]、土地生产率回归分析^[12-15]、流量回归分析^[16]、作物生长发育规律预测等。季琳琳等^[17]以不同种植密度的凤丹为材料, 成功建立凤丹株高、地径、干质量生长的 Logistic 拟合方程, 成功地推测凤丹的苗高、地径和生物量积累速生期。廖海红等^[18]采用 Logistic 模型对伞花木苗高与地径生长进行拟合, 并根据实际观测值建立动态生长模型, 掌握了一年生伞花木苗的生长规律, 为其人工高效培育种植提供了科学依据。龚江等^[19]在盐碱地研究不同土壤盐分对棉花株高生长的影响, 结果表明: 盐分胁迫下, 棉花株高生长受到抑制, 通过 Logistic 方程得到株高达到最快生长速度的时间有所推迟, 从而影响棉花的生长, 对极限生长量的预测值比较接近实际值, 在实际分析中具有一

定的应用意义。黄丽云等^[20]使用 Logistic 方程结合槟榔果实的纵径、横径成功模拟了其果实各个生理阶段的发育状况, 为提升槟榔品质奠定了基础。马二磊等^[21]使用 Logistic 方程分别对甜瓜的鲜质量、叶面积、果长、果宽和果质量的生长动态过程进行拟合, 获得 Logistic 生长模型及生长特征参数, 且拟合效果较好。岳延滨等^[22]构建基于生理发育时间的果实纵、横径生长模型以及果实鲜质量与纵、横径关系的 Logistic 模型, 为辣椒果实的无损测定提供理论和技术支撑。大量研究表明: 辣椒植株株高、果实纵径和果实横径随生理发育时间大致呈 S 形曲线变化, 采用 Logistic 模型可以很好地模拟植株和果实的生长情况并预测产量, 构建果实纵径、横径、产量的动态拟合模型, 但在云南地区开展覆膜种植条件下的辣椒模拟模型鲜有报道。本研究采用 Logistic 方程模拟辣椒株高随生长发育时间的变化, 模拟植株株高、果实纵径和横径的变化以及最大单果质量, 预测不同覆膜处理下辣椒的最大产量, 以期对区域辣椒覆膜高效种植提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在云南农业大学校内实验基地开展 (N25.13°, E102.74°, 海拔 1 984.83 m), 耕地是典型的云贵高原红土地, 土壤呈弱碱性, 土壤容重 1.21 g/cm^3 。气候属于典型的北亚热带高原季风气候区, 多年平均气温 14.7 °C, 日照率 47%~56%, 主导风向为西南风, 平均风速 2.2~3.0 m/s, 全年无霜期为 227 d。

1.2 试验设计

不同覆膜方式试验于 2020 年 7 月 13 日—12 月 28 日进行。采用垄作辣椒, 设置膜下种植 (MX)、膜侧种植 (MC) 和不覆膜种植 (NM) 3 个处理, 每个处理重复 8 次, 每个试验小区种植 3 垄, 每垄

垄长 4 m、宽 40 cm、高 20 cm, 垄间间距 40 cm。保持辣椒苗株距为 25 cm, 每垄种植 12 株, 每个试验小区的灌水量和施肥量一致。地膜种类为宽 80 cm、厚 0.05 mm 的普通聚氯乙烯农用地膜。肥料种类为氮肥(尿素)、磷肥(过磷酸钙)和钾肥(K_2O), 追氮肥 90 kg/hm²、磷肥 60 kg/hm²、钾肥 22.5 kg/hm², 追肥时间为 2020 年 8 月 29 日和 10 月 29 日。

膜侧种植条件下不同颜色地膜覆盖试验于 2021 年 5 月 31 日—10 月 28 日进行。采用垄作辣椒, 设置黑色地膜膜侧种植(HS)、透明地膜膜侧种植(TM)、银色地膜膜侧种植(YF)和不覆膜种植(NM) 4 个处理, 每个处理重复 6 次, 田间布置和追肥量与不同覆膜方式试验一致, 追肥时间为 2021 年 7 月 15 日和 9 月 15 日。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长发育时间

确定辣椒各生育期的最低、最适和最高温度为发育三基点温度(表 1), 按照公式计算相对热效应(relative thermal effect, RTE)和相对光周期效应(relative photoperiod effect, RPE), 进而计算相对生理发育效应(relative physiological developmental effects, RPDE)和生理发育时间(physiological development time, PDT)。

将辣椒实际接受温度和光照生长 1 d 的时间转化成最适温度与光照时间, 即 RTE 和 RPE, 并采用分段函数进行计算^[22-23]:

$$RTE = \begin{cases} 0 & (T \leq T_b) \\ (T - T_b)/(T_{ob} - T_b) & (T_b < T < T_{ob}) \\ 1 & (T_{ob} < T < T_{ou}) \\ (T_m - T)/(T_m - T_{ou}) & (T_{ou} < T < T_m) \\ 0 & (T \geq T_m) \end{cases};$$

$$RPE = \begin{cases} 0 & (DL \geq DL_c) \\ (DL_c - DL)/(DL_c - DL_o) & (DL_o < DL < DL_c) \\ 1 & (DL \leq DL_o) \end{cases}。$$

式中: T_{ob} 为发育最适下限温度, T_{ou} 为发育最适上限温度, T_b 为发育最低温度, T_m 为发育最高温度, T 为日平均温度; DL_c 为发育临界日长, DL_o 为发育最适日长, DL 为发育日长。

由于辣椒在开花坐果期和结果期不受光周期的影响, 因此本研究辣椒的生理发育可表示为:

$$RPDE = \begin{cases} RPE \times RTE & (SEE < PDT < FLO) \\ RTE & (PDT \geq FLO) \end{cases};$$

$$PDT = \text{SUM}(RPDE)。$$

式中: SEE 为苗期完成时所需时间, FLO 为播种到开花结果时所需时间, PDT 为 RPDE 的累积。

表 1 辣椒各生育期的发育三基点温度^[22]

Tab. 1 Three base point temperature of different development stages of pepper °C

生育时期 growth period	最低温度 minimum temperature	最适温度 optimum temperature	最高温度 maximum temperature
苗期 seedling stage	10	25~30	
开花坐果期 flowering and fruit setting stage	15	20~30	35
结果期 fruiting stage	15	25~30	

1.3.2 纵径与横径

在辣椒坐果后, 每个处理随机选择 10 个幼果, 用精度为 0.02 mm 的游标卡尺测定果实的纵径和横径, 每 7 d 测定 1 次, 直至果实成熟。

1.3.3 株高

从覆膜后第 10 天开始, 每隔 10 d 于固定时间用卷尺测量 1 次从辣椒茎基部到主茎最高处叶片分叉点的高度, 即为株高。

1.3.4 果实产量

按不同处理分开采摘, 以垄为单位计数, 称量单果质量, 并将辣椒放入 80 °C 恒温烘箱中烘干后称其干质量, 并计算果实含水量。

1.4 辣椒株高生长模型

辣椒株高随生理发育时间大致呈 S 形曲线变化, 即植株生长前期株高生长较快, 生长后期则生长较慢。采用 Logistic 方程模拟辣椒株高(H) 随生长时间的变化:

$$H = \frac{H_{\max}}{[1 + a \times \text{EXP}(-b \times \text{PDT})]}。$$

式中: $H_{\max}$ 表示株高的最大值; a 和 b 为模型参数。

1.5 果实纵、横径生长模型

辣椒果实生长主要受温度的影响^[24-25], 因此, 在养分和水分适宜条件下可以用 PDT 模拟辣椒果实的生长。采用 Logistic 方程模拟辣椒果实纵径(L)、横径(TR) 随 PDT 的动态变化:

$$L = \frac{L_{\max}}{[1 + a \times \text{EXP}(-b \times \text{PDT})]};$$

$$TR = \frac{TR_{\max}}{[1 + a \times \text{EXP}(-b \times \text{PDT})]}。$$

式中： $L_{\max}$ 表示辣椒果实纵径的最大值， $TR_{\max}$ 表示辣椒果实横径的最大值； a 和 b 为模型参数。由于 2020 年和 2021 年试验均有无膜处理以及透明地膜膜侧处理，2 年试验条件相同，果实纵径与横径测量结果相近，因此模拟时将 2 年相同处理的果实纵径、横径的平均值作为相应处理的数据值。

1.6 果实鲜质量模型

采用模型 $M = r \times TR^2 \times L$ 表示辣椒果实鲜质量 (M) 与果实纵径、横径之间的关系。式中： r 为模型参数。

1.7 辣椒产量模型

根据果实鲜质量模型计算结果建立单位面积的辣椒鲜产量模型^[22]，即：

$$Y = M \times N_f \times \rho。$$

式中： Y 为单位面积辣椒产量的鲜质量，g； M 为单个辣椒的鲜质量，g； N_f 为每株辣椒的平均果实数量； ρ 为种植密度。产量预测将 2020 年和 2021 年相同试验条件的无膜处理以及透明地膜膜侧处理数据进行平均处理。

1.8 数据统计与分析

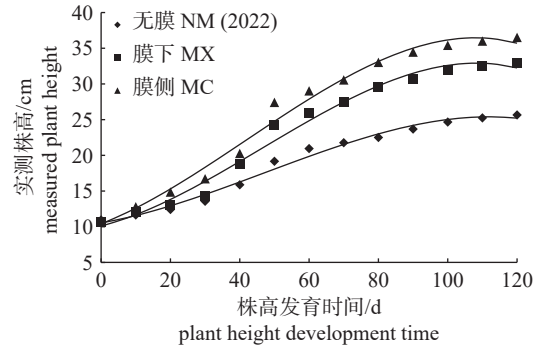
采用 Microsoft Excel 2010 整理数据并进行线性拟合；采用 OriginPro8 制图；采用 SPSS 25.0 进行数据分析，模型参数计算使用 Matlab 2018a。

2 结果与分析

2.1 株高模型参数的确定及检验

2 年辣椒株高试验数据实测值如图 1、2 所示。以生长时间为驱动，建立 Logistic 模型模拟辣椒株高的动态生长过程，通过模拟确定模型的参数 a 、 b 以及模拟的最大株高，由计算结果 (表 2) 可知：NM (2021)、TM 和 HS 处理的模拟值与实测值之间的决定系数 (R^2) 均大于 0.99，均方根误差 (RMSE) 小于 2，模型的符合度较高；NM (2020)、MX、MC 和 YF 处理的模拟值与实测值之间的 R^2 均大于 0.87，RMSE 介于 1.5~4.0 之间，可以较好地模拟株高生长。从模拟的最大株高值来看，不同覆膜方式以膜侧种植对辣椒株高有较好的提升作用；2021 年膜侧种植的模拟结果表明：采用黑色地膜可以有效地增加辣椒株高。

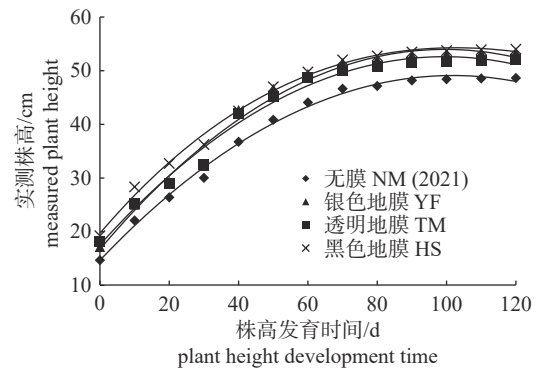
由模拟的符合程度 (图 3) 可知：MX、NM (2021)、TM 和 HS 处理的斜率拟合值最接近 1，



注/Note: NM. non-mulching planting, MX. planting under mulch film, MC. mulch film side planting; 下同/the same as below.

图 1 不同覆膜处理对辣椒株高的影响

Fig. 1 Effects of different mulching treatments on the pepper plant height



注/Note: YF. silver mulch film, TM. transparent mulch film, HS. black mulch film; 下同/the same as below.

图 2 不同颜色膜侧处理对辣椒株高的影响

Fig. 2 Effects of different color film side planting treatments on the pepper plant height

表明模拟值与实测值相差较小，且 R^2 均大于 0.95，模拟效果较好。MX 和 NM (2021) 处理的实测值呈偏大趋势 (实测值/模拟值 > 1)；TM 和 HS 处理的实测值相较于模拟值偏小 (实测值/模拟值 < 1)。NM (2020)、MC 和 YF 处理模拟的斜率在 0.95~0.99 之间，模拟值与实测值的差距相对较大，且实测值相较于模拟值均偏小 (实测值/模拟值 < 1)。NM (2021)、HS、MX 和 MC 处理的 R^2 均大于 0.97，RMSE 介于 0.80~1.70 之间，模拟效果较好；YF 处理的 R^2 为 0.9178，RMSE 为 4.00，模拟的符合程度相对较低，但仍在可接受范围。因此，除银色地膜膜侧处理的模拟符合度相对较差外，该模型可以较好地模拟辣椒株高生长随时间的动态变化。

2.2 纵、横径生长模型参数的确定及检验

根据 2 年不同覆膜处理的试验数据，辣椒果

表 2 株高模拟参数
Tab. 2 Plant height simulation parameters

处理 treatments	模拟最大株高/cm simulated maximum plant height	模型参数 <i>a</i> model parameter <i>a</i>	模型参数 <i>b</i> model parameter <i>b</i>	决定系数 (<i>R</i> ²) coefficient of determination	均方根误差 (RMSE) root mean square error
无膜 NM (2020)	31.35	2.170 5	0.006 9	0.915 2	1.753 3
膜下 MX	33.29	1.945 0	0.008 4	0.882 8	3.185 6
膜侧 MC	39.25	2.620 0	0.008 4	0.872 3	3.744 2
无膜 NM (2021)	49.59	2.255 0	0.046 7	0.995 2	0.882 4
透明地膜 TM	54.22	1.352 0	0.034 7	0.994 5	0.826 6
银色地膜 YF	53.64	2.847 3	0.076 1	0.880 2	3.812 2
黑色地膜 HS	54.90	1.706 0	0.045 2	0.993 5	1.024 0

注/Note: NM, non-mulching planting, MX, planting under mulch film, MC, mulch film side planting, TM, transparent mulch film, YF, silver mulch film, HS, black mulch film; 下同/the same as below.

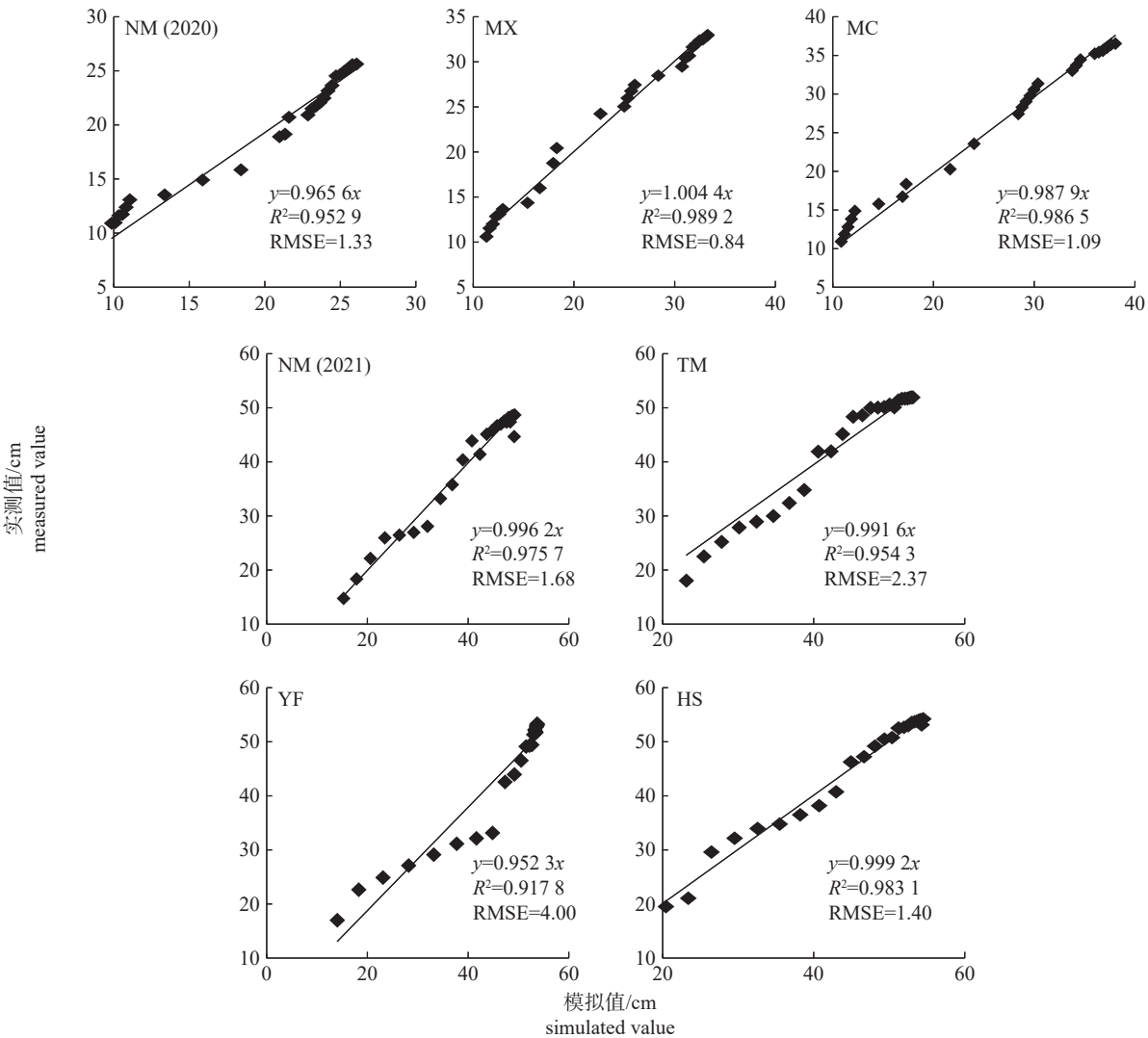


图 3 不同处理下株高模拟值与实测值比较
Fig. 3 Comparison between simulated and measured values of plant height under different treatments

实纵、横径随生理发育时间的变化如图 4 所示，果实长度生长发育较快，横向膨大生长速率也较快；坐果 40 d 后，果实纵向与横向生长均逐渐减缓。

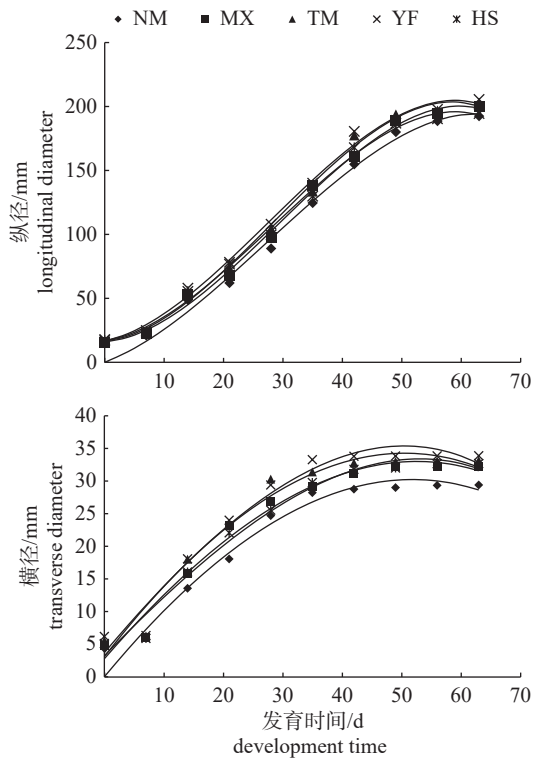


图 4 不同覆膜处理辣椒果实纵、横径随生理发育时间的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of longitudinal and transverse diameters of pepper fruits with physiological development time under different film mulching treatments

以坐果后果实发育时间为驱动，结合辣椒纵、横径的观测数据，采用 Logistic 方程模拟辣椒果实纵、横径的动态生长过程，通过 Matlab2018a 可以确定模型参数 a 、 b 以及模拟的最大纵径和最大横径 (表 3)，其中对辣椒果实纵径模拟值与实测值之间的 R^2 均大于 0.99，整体模型的符合度较高；对于横径的模拟，除 NM 处理模拟效果较

差外，该模型可以较好地模拟辣椒果实横径随坐果时间的动态变化。

由图 5 可知：就纵径的模拟结果而言，NM 处理下，实测值相较于模拟值呈偏大趋势 (实测值/模拟值>1)；而覆膜处理下的实测值相对于模拟值偏小 (实测值/模拟值<1)，其中，纵径模拟的 RMSE 均大于 2.00，而 R^2 均大于 0.99。就横径模拟结果而言，模型除对 NM 处理下辣椒果实的横径模拟较差外，其他处理辣椒果实横径模拟值与实测值之间的 RMSE 在 1.11~1.47 之间， $R^2>0.98$ ，实测值相对于模拟值均偏小 (实测值/模拟值<1)。说明模型可以较好地模拟辣椒果实横、纵径的变化，且符合度较高。

2.3 辣椒果实鲜质量模型检验

由图 6 可知：NM、MX、TM、YF 和 HS 处理下辣椒果实的鲜质量参数 r 分别为 0.101 0、0.084 3、0.073 6、0.076 0 和 0.079 3，结合辣椒果实纵径与横径的平方以及对应的单果鲜质量试验数据对辣椒果实鲜质量模型进行检验，结果 (图 7) 显示：不同处理果实鲜质量实测值大于模拟值 (实测值/模拟值>1)，模拟值与实测值之间的 RMSE 在 1.21~1.87 之间， $R^2>0.9$ ，模拟符合度较高。因此，该模型能较好地模拟辣椒果实鲜质量。

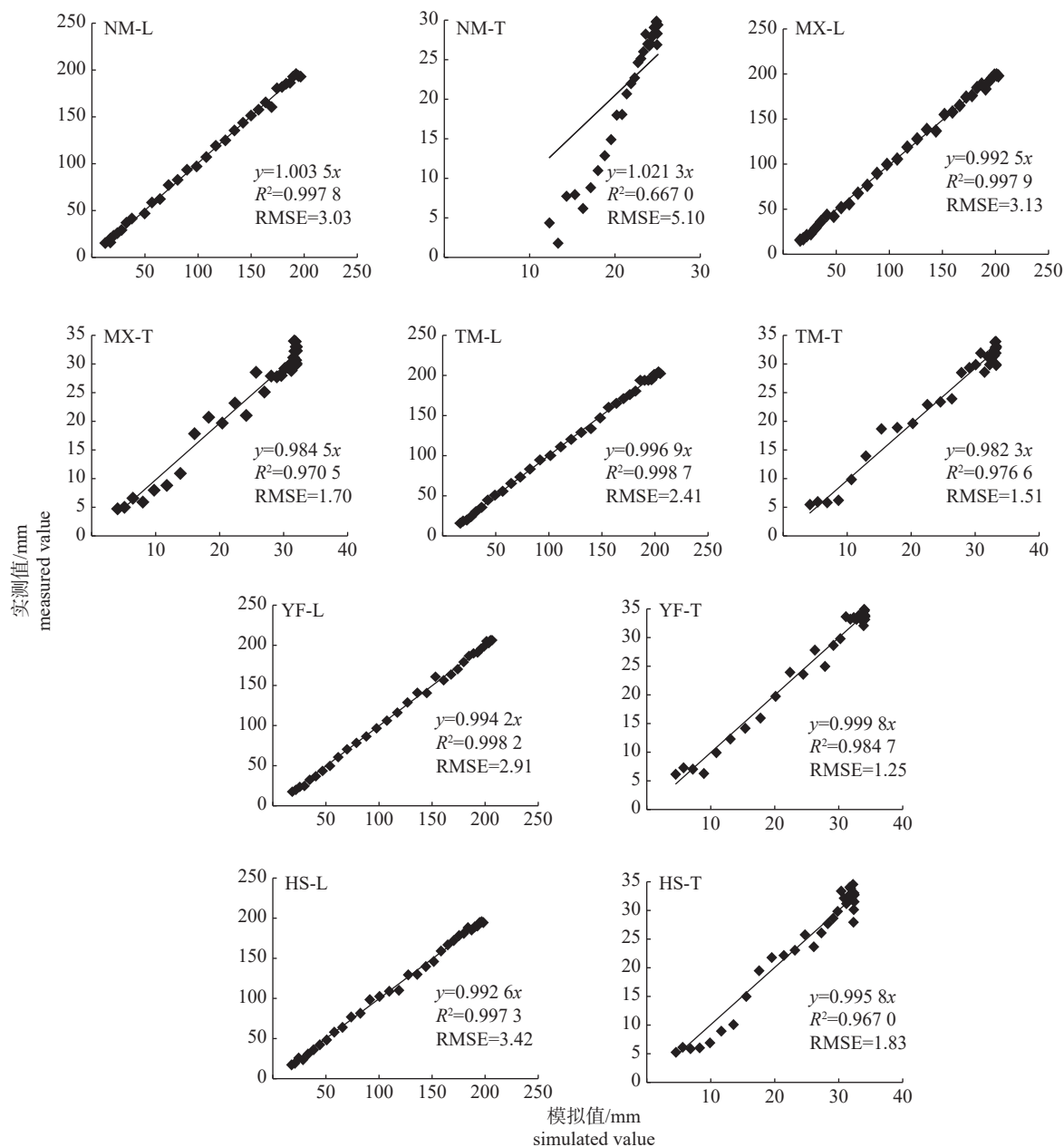
2.4 辣椒果实产量预测

由表 4 可知：覆膜种植的产量比不覆膜种植大幅度提高，且以银色地膜增产效果最好。银色地膜和透明地膜膜侧种植优于膜下种植，膜下和膜侧种植的增产效果明显优于无膜种植。通过模拟预测可得出：覆膜种植辣椒产量可以提高 75.93%~132.39%。

表 3 辣椒果实纵、横径模型参数

Tab. 3 Parameters of models on longitudinal and transverse diameter of pepper

处理方式 treatments	模拟最大纵径/mm simulated maximum longitudinal diameter	模拟最大横径/mm simulated maximum transverse diameter	模型参数 a model parameter a	模型参数 b model parameter b	决定系数 (R^2) coefficient of determination	均方根误差 (RMSE) root mean square error
NM	207.50	—	14.2100	0.088 1	0.9962	4.835 8
	—	25.29	1.1350	0.080 1	0.6913	6.291 4
MX	211.90	—	13.3800	0.090 4	0.9961	5.055 7
	—	32.05	7.9790	0.138 9	0.9918	1.110 8
TM	214.00	—	13.0500	0.092 5	0.9921	6.486 2
	—	33.19	8.1560	0.149 0	0.9882	1.367 2
YF	214.10	—	11.7800	0.091 6	0.9953	5.662 6
	—	34.23	7.5860	0.140 4	0.9869	1.470 7
HS	207.30	—	11.5600	0.088 6	0.9920	6.194 8
	—	32.66	7.0820	0.124 2	0.9865	1.258 1



注: L. 纵径, T. 横径。

Note: L. longitudinal diameter, T. transverse diameter.

图5 辣椒果实纵、横径模拟值与实测值比较

Fig. 5 Comparison between simulated and measured values of longitudinal and transverse diameter of pepper

3 讨论

辣椒是一种短日照作物,温度是影响辣椒果实生长最重要的环境因子^[26]。WALKER等^[27]认为:土壤温度只要变化1℃,就会对植株的生理特征产生明显影响。从全生育期内各处理的株高变化来看,地膜对植株的生长具有十分明显的影响^[28-29]。本研究使用 Logistic 模型模拟不同覆膜方式下辣椒株高以及果实纵径和横径随时间的变

化,结果发现:对株高和果实的影响均为膜侧>膜下>无膜处理,从 R^2 和RMSE来看,模拟精度较好。膜侧种植的土壤温湿利用率高于膜下种植,导致膜侧种植更有利于株高生长,同时增大了果实纵径与横径,提高了产量,这与曹昌林等^[30]的研究结论相似。与膜下处理相比,膜侧处理辣椒根系所处的土壤温度低2.9℃,可避免由于土壤温度太高而导致的营养矿物质化引起早

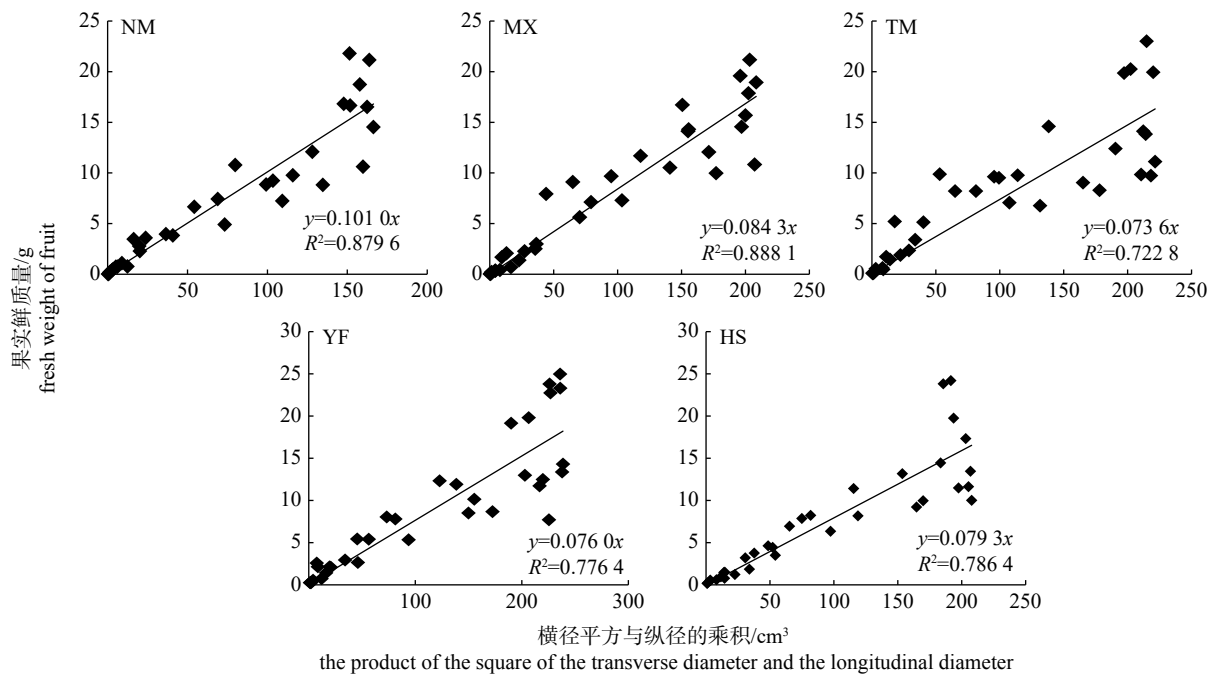


图 6 辣椒果实鲜质量与纵、横径的关系

Fig. 6 Relationship between fresh weight and longitudinal and transverse diameter of pepper

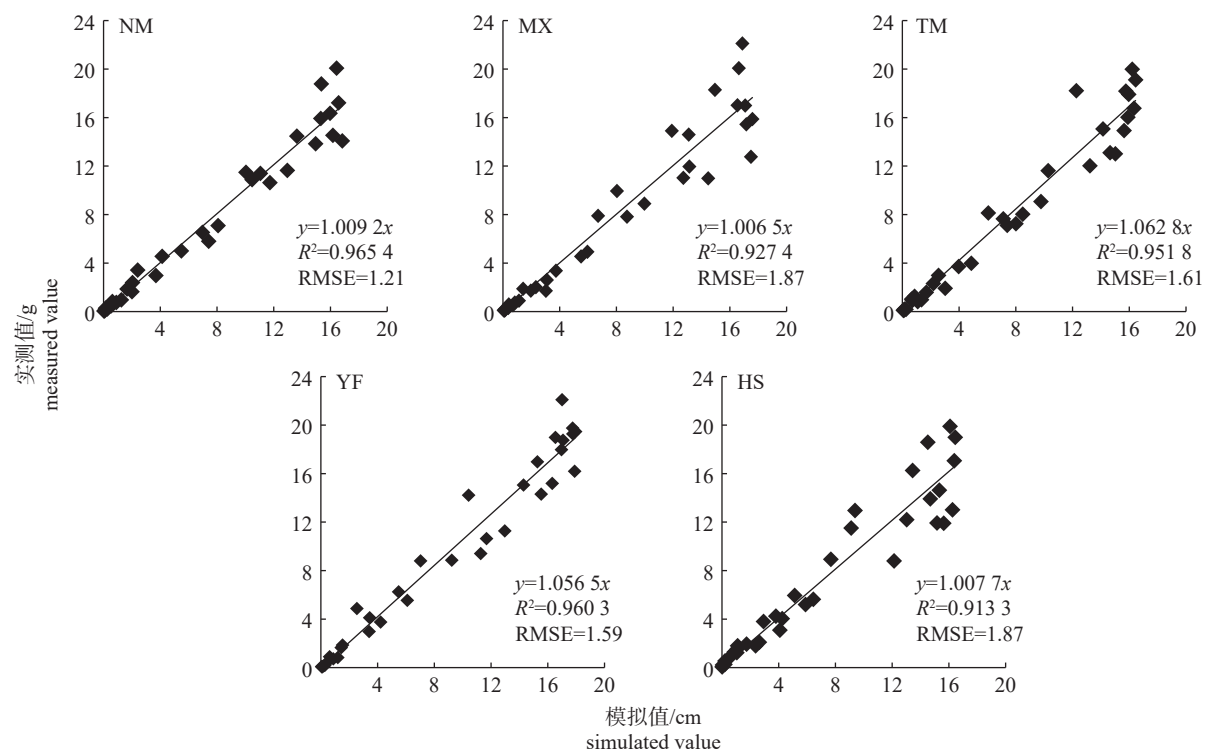


图 7 辣椒果实鲜质量模拟值与实测值比较

Fig. 7 Comparison between simulated and measured fresh weight of pepper

衰,使得膜侧处理的株高和果实性状发育优势明显,与阎旭东等^[31]的结论相似。郭景山等^[32]认为:膜侧处理的株高、单果品质均高于膜下处理,这可能是由于不同覆膜方式为植株营造了不

同的生长环境,但更深层次的原因还有待研究。覆膜处理下辣椒植株的株高均高于不覆膜处理,与王陈芹等^[33]的研究结论相似。综合本研究结果,相较于膜下和不覆膜处理,膜侧处理营造的

表4 辣椒产量预测

Tab. 4 Pepper production forecast

处理 treatments	模拟单果鲜质量/g simulated fresh weight of single fruit	平均单株辣椒果实数量 average number of pepper fruit of per plant	种植密度/(株·hm ⁻²) planting density/(plant·hm ⁻²)	模拟产量/(kg·hm ⁻²) simulated yield	实测产量/(kg·hm ⁻²) measured yield
NM	13.43	23	37500	11583.45	10974.30
MX	18.31	30	37500	20598.75	17994.75
TM	17.37	35	37500	22798.20	21838.80
YF	18.89	38	37500	26918.25	25285.95
HS	17.53	31	37500	20378.70	19041.75

土壤温湿环境更适合辣椒植株和果实的生长发育,可较好地解决膜下种植导致土壤温度过高而降低辣椒株高和果实性状提升效果的问题。

不同颜色地膜对短波和长波辐射的吸收、反射和透射作用效果不同,通过改变光照环境从而可以改变土壤温度,导致生长及产量发生改变^[34-36],李宗耕等^[37]研究发现:银色地膜隔热性能较好,根区温度日变化平缓,降温效果显著;黑色地膜隔热性能差,根区温度日变化剧烈,降温效果差,且黑色地膜在土壤表面放热较为突出。本研究通过使用 Logistic 模型拟合不同颜色地膜膜侧处理辣椒的株高以及果实纵径和横径随时间的变化,结果表明:对株高的影响为黑色地膜>透明地膜>银色地膜>不覆膜,而对果实纵径和横径的提升效果则表现为银色地膜>透明地膜>黑色地膜>不覆膜,从 R^2 和 RMSE 来看,模拟精度较好。刘岳飞等^[38]认为:在辣椒实际生产中,覆盖无色透明地膜、黑色地膜和银色地膜不仅有助于提高辣椒生长环境中不同土层的土壤温度与含水量,同时对降低土壤 pH、提高土壤微生物生物量以及酶活性具有显著的效果,而且还有助于提高土壤肥力和保持土壤健康。综合本研究结果来看,隔热性较差的黑色地膜对辣椒的株高提升效果最明显,而隔热和保湿效果最好的银色地膜则更适合提升辣椒的横径和纵径等果实性状。

运用不同生长模型模拟结果的精度不尽相同^[39]。蔡甲冰等^[40]研究发现:Logistic 模型能够较好地模拟作物生育期的生理生态发育和生长过程,采用 Logistic 归一化模型,能够有效地模拟区域玉米干物质增长。王信理^[41]对 Logistic 方程进行了修正,并将其应用于模拟作物的叶、茎、穗以及干质量增量的动态过程,取得了较为优良的效果。本研究构建的模型可以较好地模拟昆明地区不同覆膜方式下辣椒株高、纵径和横径的生

长,并对不同颜色地膜与不同覆膜方式处理下的辣椒产量进行预测,可为研究区域辣椒高效种植提供参考。

4 结论

基于生长发育时间的 Logistic 模型可以较好地模拟昆明地区辣椒株高与生长时间、纵横径与坐果时间的动态生长变化,鲜质量模型的模拟值与实测值的 RMSE 在 1.21~1.87 之间, $R^2>0.9$,能较好地预测辣椒果实鲜质量。从模拟结果来看,膜侧种植相较于膜下种植对辣椒株高有较好的提升作用,黑色地膜相较于银色和透明地膜更能提升辣椒株高;对纵径而言,不覆膜情况下,实测值相比于模拟值偏大,而覆膜处理的实测值相对于模拟值偏小;对横径而言,模型对不覆膜处理下辣椒果实的横径模拟较差,对覆膜处理下辣椒果实横径模拟效果较好,符合度较高。

[参考文献]

- [1] GRASSO R, SOUZA R D, PEÑA-FLEITAS M T, et al. Root and crop responses of sweet pepper (*Capsicum annuum*) to increasing N fertilization[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 273: 109645. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109645.
- [2] 姚明华, 王飞. 不同栽培处理方式对早春辣椒产量的影响[J]. 辣椒杂志, 2010, 8(3): 48. DOI: 10.16847/j.cnki.issn.1672-4542.2010.03.019.
- [3] 杨树敏. 早春辣椒高产高效种植技术[J]. 山西农经, 2019(14): 99. DOI: 10.16675/j.cnki.cn14-1065/f.2019.14.062.
- [4] 孙贵拓, 杨柯, 杨若翰, 等. 2017年昆明市大春作物生育期内气象条件影响分析[J]. 云南农业科技, 2019(4): 24. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0488.2019.04.010.
- [5] 曾和平. 金沙江支流龙川江流域河流输沙特征及其对气候和地表覆被变化的响应[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [6] 周晓晨, 李永梅, 王自林, 等. 坡耕地红壤农作物根系与团聚体稳定性的关系[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2017, 37(11): 818. DOI: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.2017.11.010.

- [7] 罗维钢, 黄忠华, 钟东, 等. 微喷灌不同灌溉定额对赤红壤甘蔗生长的影响[J]. 广西水利水电, 2020(4): 1. DOI: 10.16014/j.cnki.1003-1510.2020.04.002.
- [8] 文启凯, 刘玉兰, 杨光碧, 等. 玉米膜外栽培土壤生态条件的初步研究[J]. 土壤通报, 1991, 22(1): 12. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.1991.01.005.
- [9] 李先文, 唐兴贵, 罗占云, 等. 秸秆覆盖方式对云烟87田间生长及产质量的影响探究[J]. 南方农业, 2019, 13(23): 19. DOI: 10.19415/j.cnki.1673-890x.2019.23.010.
- [10] 陈先冠, 冯利平, 马雪晴, 等. 不同播期和灌水条件下冬小麦生物量变化与产量模拟[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 349. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.036.
- [11] 易雨君, 谢泓毅, 宋劫, 等. 黄河口盐沼湿地植被群落适宜生境模拟 I: 理论[J]. 水利学报, 2021, 52(3): 255. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20200542.
- [12] 陈铸, 傅伟聪, 黄雅冰, 等. 基于Logistic-CA-Markov模型的福州市土地利用演变与模拟[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(6): 1092. DOI: 10.13610/j.cnki.1672-352x.20190102.007.
- [13] 陈训争, 范胜龙, 林晓丹, 等. 基于Logistic-CA-Markov模型的龙海市土地利用/覆被变化与模拟[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(6): 685. DOI: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2017.06.014.
- [14] 林晓丹, 范胜龙, 孙巧燕, 等. 基于GIS和Logistic回归模型的土地利用空间模拟与分析: 以龙海市为例[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(4): 468. DOI: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2017.04.018.
- [15] 陈颐, 林毅伟, 林丽丽, 等. 基于Markov和Logistic模型的莆田市土地利用变化及林地转出空间模拟[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(2): 87. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2017.02.11.
- [16] 琪美格. 白杨河4至5月平均流量多项Logistic回归分析与预报[J]. 地下水, 2021, 43(4): 203. DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2021-04-070.
- [17] 季琳琳, 姚建林, 陈素传, 等. 不同播种密度1年生凤丹苗年生长节律及性状相关性研究[J]. 安徽林业科技, 2021, 47(2): 10. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0152.2021.02.003.
- [18] 廖海红, 代丽华, 孔小丽, 等. 伞花木1年生播种苗生长节律研究[J]. 南方林业科学, 2021, 49(3): 11. DOI: 10.16259/j.cnki.36-1342/s.2021.03.003.
- [19] 龚江, 郭慧娟, 石培春, 等. 基于Logistic方程对不同土壤盐分棉花株高生长的模拟研究[J]. 新疆农垦科技, 2021, 44(4): 7. DOI: 10.3969/j.issn.1001-361X.2021.04.006.
- [20] 黄丽云, 刘立云, 齐兰, 等. 基于Logistic模型的槟榔果实生长发育研究[J]. 热带农业科学, 2018, 38(8): 105. DOI: 10.12008/j.issn.1009-2196.2018.08.020.
- [21] 马二磊, 黄芸萍, 臧全宇, 等. 甜瓜植株和果实生长模型的拟合与分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49(7): 1358. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1191.2018.07.15.
- [22] 岳延滨, 李莉婕, 聂克艳, 等. 辣椒果实生长及产量形成模拟研究[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(8): 200. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2013.08.053.
- [23] 潘玉娇. 不同水分条件下辣椒生长发育与干物质积累模拟模型的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2007.
- [24] 尹杰. 辣椒生长过程的可视化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- [25] 刁明, 戴剑锋, 罗卫红, 等. 温室甜椒生长与产量预测模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 241. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.10.044.
- [26] KRÄMER U. Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2005, 16(2): 133. DOI: 10.1016/j.copbio.2005.02.006.
- [27] WALKER, JOHN M. One-degree increments in soil temperatures affect maize seedling behavior[J]. Soil Science Society of America Journal, 1969, 33(5): 729. DOI: 10.2136/sssaj1969.03615995003300050031x.
- [28] 孔伟程, 冯绍元, 王凤新, 等. 不同覆膜对滴灌马铃薯土壤水热及其生长的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(5): 10. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2020.05.002.
- [29] 王星垚, 李援农, 银敏华, 等. 不同地膜对土壤水热状况和冬小麦植株氮素的影响[J]. 节水灌溉, 2018(2): 40. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2018.02.009.
- [30] 曹昌林, 张建华, 白文斌. 不同覆膜种植方式下旱地高粱土壤水温的变化及产量效应[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2020, 40(3): 78. DOI: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.201912026.
- [31] 阎旭东, 王秀领, 徐玉鹏, 等. 旱地春玉米不同覆膜种植模式的增产效应[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(1): 75. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170236.
- [32] 郭景山, 李文刚, 曹春梅, 等. 旱地马铃薯覆膜和膜侧种植处理比较试验[J]. 中国马铃薯, 2011, 25(2): 82. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3635.2011.02.006.
- [33] 王陈芹, 杨帆, 赵仁全, 等. 种植密度、肥料及覆膜对辣椒生长及经济性状的影响[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(10): 110. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2017.10.026.
- [34] 张泽锦, 王力明, 雷晓葵, 等. 四川盆地3种颜色地膜对秋季土壤温度及黄瓜产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 42. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2020275.
- [35] 吴贤忠, 赵锦梅, 李毅, 等. 黄土高原半干旱区不同颜色地膜对土壤温度的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 43. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2017.0443.
- [36] 孙仕军, 朱振闯, 陈志君, 等. 不同颜色地膜和种植密度对春玉米田间地温、耗水及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(19): 3323. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2019.19.004.
- [37] 李宗耕, 傅国海, 刘文科. 覆膜种类对夏季日光温室起垄内嵌式基质栽培根区温热的影响[J]. 农业工程技术, 2018, 38(1): 44. DOI: 10.16815/j.cnki.11-5436/s.2018.01.008.
- [38] 刘岳飞, 吴人敏, 张传进, 等. 地膜对植椒土壤生物学特性和细菌多样性的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 986. DOI: 10.11766/trxb201810100018.
- [39] 朱光玉, 康立, 何海梅, 等. 基于树高—年龄分级的杉木人工林多形立地指数曲线模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 3(7): 18. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.07.003.
- [40] 蔡甲冰, 常宏芳, 陈鹤, 等. 基于不同有效积温的玉米干物质累积量模拟[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 263. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.029.
- [41] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用Logistic方程[J]. 农业气象, 1986(1): 14.

责任编辑: 何承刚