

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.01.004

蔡淑芳,吴宝意,雷锦桂.基于光温效应的大白菜生理特性及营养品质动态模拟效果[J].中国农业气象,2021,42(1):34-43

基于光温效应的大白菜生理特性及营养品质动态模拟效果*

蔡淑芳, 吴宝意, 雷锦桂**

(福建省农业科学院数字农业研究所, 福州 350003)

摘要: 在温室环境下, 研究大白菜生理特性及营养品质与气温、光合有效辐射的动态模拟关系, 以期为温室大白菜生长管理与环境优化调控提供参考。2020 年 6–9 月, 以“新早熟 5 号”大白菜为试材开展前后三期实验, 自动采集温室气温和光合有效辐射数据, 每 3d 进行 1 次大白菜生理特性及营养品质测定。计算实验期间各处理大白菜光温效应 LTF 以及辐射热 TEP、积温 GDD 值, 利用一期实验数据建立生理特性及营养品质动态模拟模型; 利用独立两期实验数据开展模型检验, 比较动态模拟模型的预测效果。检验结果表明, 对大白菜各项生理特性及营养品质的模拟, 以 LTF 模型效果较佳, $R^2 > 0.956$, $RMSE < 46.752$, $RE < 11.99\%$, LTF 模型拟合度和模拟精度优于 GDD 和 TEP 模型。其中, 大白菜叶片可溶性糖、可溶性蛋白和维生素 C 含量呈单峰曲线变化规律, 其 LTF 模型可用 Extreme 函数表达; 硝酸盐含量呈“N”字形变化规律, 其 LTF 模型可用 Poly5 函数表达; 纤维素、根系活力、叶绿素(a、b、a+b)和类胡萝卜素呈“S”型变化规律, 纤维素 LTF 模型可用 Gompertz 函数表达, 其余指标 LTF 模型可用 Logistic 函数表达。LTF 法能根据气温和光合有效辐射数据较精准地预测温室大白菜生理特性及营养品质, 为建立更具普适性的温室大白菜生长模型提供参考。

关键词: 温室; 大白菜; 生理特性; 营养品质; 光温效应

Dynamic Simulation Effect of Physiological Characteristics and Nutritional Quality of Chinese Cabbage Based on Light and Temperature Function

CAI Shu-fang, WU Bao-yi, LEI Jin-gui

(Institute of Digital Agriculture, FAAS, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Studying the relationship among ambient temperature, photosynthetically active radiation and physiological characteristics, nutritional quality of Chinese cabbage in greenhouse can provide reference for growth management and environmental optimization of facility cultivating Chinese cabbage. From June to September 2020, the "New Zaoshu No.5" Chinese cabbage was used as the test material for carrying out 3 experiments. Ambient temperature and photosynthetically active radiation data in greenhouse were collected automatically by automatic acquisition system, and physiological characteristics, nutritional quality of Chinese cabbage were measured once every 3 days. Light and temperature function, thermal effectiveness and photosynthetically active radiation, growing degree days of experiment days were calculated. One period experiment data was used to establish dynamic simulation models of physiological characteristics and nutritional quality. The prediction effect of the dynamic simulation models was verified and compared with the data of another 2 period experiments. The results showed that the average daily ambient temperature during the experiments was 33.06–38.31 °C, and the daily photosynthetically active radiation was 3.84–19.37 mol·m⁻²·d⁻¹. The simulation effect of LTF models on physiological characteristics and nutritional quality of Chinese cabbage was good, which R^2 was > 0.956 , $RMSE$ was < 46.752 and RE was $<$

* 收稿日期: 2020-09-09

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2017J01045); 福建省农业科学院项目(A2018-4; YDXM2019006; STIT2017-2-12)

**通讯作者: 雷锦桂, 研究员, 研究方向为数字农业, E-mail: 71906244@qq.com

第一作者联系方式: 蔡淑芳, E-mail: csf2019@qq.com

11.99%。The degree of fit and simulation accuracy of LTF models were better than that of GDD and TEP models. Among them, soluble sugar, soluble protein and vitamin C showed the change of single peak curve, which LTF model could be expressed as extreme function. Nitrate showed the change of N-shaped curve, which LTF model could be expressed as Poly5 function. Cellulose, root activity, chlorophyll (a, b, a+b) and carotenoids showed the change of S-type curve, among them, Cellulose LTF model could be expressed as Gompertz function, and the other indexes LTF model could be expressed as Logistic function. LTF method can accurately predict physiological characteristics and nutritional quality of Chinese cabbage in greenhouse based on ambient temperature and photosynthetically active radiation. LTF method can provide a reference for the establishment of a more general growth model of Chinese cabbage in greenhouse.

Key words: Greenhouse; Chinese cabbage; Physiological characteristics; Nutritional quality; Light and temperature function

大白菜营养丰富, 深受消费者喜爱。以往大白菜主要是秋季栽培, 为满足市场需求, 实现其周年市场供应, 早熟、耐热型大白菜的温室栽培已成为目前发展趋势^[1]。然而, 大白菜设施栽培及管理技术等多依靠传统经验, 量化及精细操作手段相对比较缺乏, 大白菜设施栽培生产效益提升空间较大。鉴于可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C、纤维素、硝酸盐含量是评价植物营养品质的主要指标; 叶绿素(a、b、a+b)、类胡萝卜素反映植物光合作用的强弱, 根系活力则指征根系的生长情况和活力水平^[2-3], 研究大白菜生理特性及营养品质动态变化趋势, 有助于了解和调控大白菜生长态势与品质形成, 对提高温室大白菜生产经济效益具有重要的科研和现实意义。

大白菜生长发育受到基因型和环境型因素的影响, 其中光、温作用较大。在光、温对大白菜生理特性及营养品质影响方面, 虽然前人进行了大量的研究, 但研究内容主要集中于大白菜耐热性与耐寒性鉴定^[4-5], 大白菜对光、温胁迫的生理响应^[6-7], 以及温室环境调控下的大白菜生长等^[3,8]; 研究方法主要是以比较分析为主, 方法相对单一。而将光、温指标结合考虑, 并对大白菜生理指标进行动态模拟的研究还未见报道。前人研究表明^[9-11], 作物生长模拟模型是进行温室作物生长管理和环境优化调控的有力工具, 光温效应 (Light and Temperature Function, LTF)、辐热积 (Thermal Effectiveness and Photosynthetically Active Radiation, TEP)、积温 (Growing Degree Days, GDD) 等结合光、温指标的方法已在番茄、黄瓜、草莓、生菜、小白菜等作物模拟上得到应用。其中, 在三种方法的模拟效果比较上, 谭文等^[9]发现, 与传统的 TEP 和 GDD 模型相比, LTF 模型在对小白菜“四

月慢”的营养品质模拟上显著提高了模拟精度。

本研究以 LTF 模型为基础, 基于耐热大白菜生长发育的三基点温度, 构建福州主栽大白菜品种“新早熟 5 号”的主要生理特性及营养品质的动态模拟模型, 并通过不同播期大白菜的实验数据对模型进行检验, 以期准确预测不同光、温环境下大白菜主要生理特性及营养品质, 为大白菜生长管理及环境优化调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

2020 年 6-9 月在福建省农业科学院示范农场薄膜温室内, 以福州主栽大白菜品种“新早熟 5 号”为试材, 进行分期播种实验。实验分三期进行, 第一期 (T1) 为 2020 年 6 月 16 日 (移栽)-7 月 16 日 (收获), 第二期 (T2) 为 7 月 2 日 (移栽)-8 月 1 日 (收获), 第三期 (T3) 为 8 月 2 日 (移栽)-9 月 1 日 (收获)。每期实验设 3 次重复, 每个重复 250 株, 每期共计 750 株。T1、T2、T3 的播种时间分别为 2020 年 5 月 27 日、6 月 12 日、7 月 13 日。

采用主要成分为草炭和蛭石的基质育苗, 穴盘规格为 17×26 穴; 经人工基质装盘和压穴浇水后, 利用“URBINATI”高速穴盘播种机播种, 每穴播种 1 粒。播种后将穴盘置于薄膜温室内育苗区进行正常育苗操作。当苗长至 4 叶 1 心时进行移栽, 并采取营养液膜技术 (Nutrient Film Technique, NFT) 栽培, 栽培密度为 32 株·m⁻²。实验期间, 气温和光合有效辐射由“新农云”环境数据采集系统实时自动采集, 数据采集频率为每 30s 采集一次。温度和光合有效辐射传感器位于薄膜温室内 NFT 栽培区域上方 1m 处。T1 处理的气象数据用于模型建立, T2、T3 处理的气

象数据用于模型验证。在模型计算中气象数据以 0.5h 为单位,取每 0.5h 的平均值。水肥管理由水肥机自动控制,EC 和 pH 分别为 1.7~2.2mS·cm⁻¹、5.5~6.0。

1.2 主要生理特性和营养品质指标观测

从第 4 片真叶出现后移栽时即开始观测,每 3d 选取 5 棵植株,持续取样 30d;共计每期观测 11 次,共 55 棵植株。经破坏性取样,测定植株叶片的可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C、纤维素、硝酸盐、光合色素(叶绿素 a、b 和 a+b、类胡萝卜素)含量和根部的根系活力。测定方法分别为蒽酮-硫酸比色法^[12]、考马斯亮蓝 G-250 法^[13]、紫外分光光度法^[14]、蒽酮比色法^[13]、水杨酸比色法^[13]、丙酮乙醇混合液法^[15]、TTC 法^[13]。

1.3 计算模型

分别用 LTF(光温效应)、TEP(辐热积)和 GDD(积温)^[9-10,16] 三种方法建立大白菜主要生理特性和营养品质指标动态模拟方程,并对三种方法的模拟结果进行比较,分析光温效应模型的模拟效果。

光温效应(LTF)模型

$$f_{T(j)} = RTE_j = (1/48) \sum_{i=1}^{48} RTE(T_i) \quad (1)$$

$$RTE(T_i) = \begin{cases} 0 & (T_i < T_b) \\ (T_i - T_b)/(T_{ob} - T_b) & (T_b \leq T_i < T_{ob}) \\ 1 & (T_{ob} \leq T_i \leq T_{ou}) \\ (T_m - T_i)/(T_m - T_{ou}) & (T_{ou} < T_i \leq T_m) \\ 0 & (T_i > T_m) \end{cases} \quad (2)$$

$$L_j = PAR_j = \sum_{i=1}^{48} [PAR(i) \cdot 1800] \quad (3)$$

$$f_{L(j)} = 1 - e^{-\alpha L_j} \quad (4)$$

$$LTF_j = f_{L(j)} \cdot f_{T(j)} \quad (5)$$

$$LTF = \sum LTF_j \quad (6)$$

TEP 模型

$$TEP_j = (L_j \cdot f_{T(j)})/1000 \quad (7)$$

$$TEP = \sum TEP_j \quad (8)$$

GDD 模型

$$GDD_j = \begin{cases} 0 & (T_{avg(j)} \leq T_b) \\ T_{avg(j)} - T_b & (T_b < T_{avg(j)} < T_m) \\ T_m - T_b & (T_{avg(j)} \geq T_m) \end{cases} \quad (9)$$

$$T_{avg(j)} = 1/48 \sum_{i=1}^{48} T_i \quad (10)$$

$$GDD = \sum GDD_j \quad (11)$$

式中, $f_{T(j)}$ 为第 j 天温度热效应, RTE_j 为第 j

天的日平均相对热效应; $RTE(T_i)$ 为温度 T_i 的相对热效应; T_i 为 1 日内第 i 个 0.5h 的温室平均温度(°C)。 T_m 和 T_b 为生长温度上下限,分别取值 40°C 和 5°C; T_{ou} 和 T_{ob} 为生长最适温度上下限,白天取值为 35°C 和 20°C,夜间取值为 25°C 和 15°C^[2,4,6]。 L_j 为第 j 天光合有效辐射 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); $PAR(i)$ 为 1 日内第 i 个 0.5h 的平均光合有效辐射 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); 1800 为将 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 换算成 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (0.5\text{h})^{-1}$ 的单位换算系数。 $f_{L(j)}$ 为第 j 天的光效应; α 为函数的曲率,取值 0.001^[17]。 LTF_j 为第 j 天的光温效应; LTF 为累积光温效应。 TEP_j 为第 j 天的辐热积 ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); 1/1000 为将 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 换算成 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的单位换算系数; TEP 为累积辐热积 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。 GDD_j 为第 j 天的积温 (°C·d); $T_{avg(j)}$ 为第 j 天的温室平均温度 (°C); GDD 为累积积温 (°C·d)。

1.4 模型评价

采用决定系数 R^2 、回归估计标准误差 (Root Mean Squared Error, RMSE)、相对误差 (Relative Error, RE) 对模型进行检验^[9-11]。 R^2 越大,表明模型的拟合效果越好; RMSE 和 RE 越小,表明模型预测精度越高。

1.5 数据处理

采用 Origin8.5 软件对数据进行处理及作图。

2 结果与分析

2.1 光温效应(LTF)模型的建立

2.1.1 温度和光合有效辐射

由图 1a 可见,2020 年 6~9 月,各处理大白菜生长期间(30d)的日平均气温均较高,在 33.1~38.3°C,且主要集中在 34.0~37.0°C 区间。在三期实验中,温度的逐日变化过程略有差别,日平均气温分别在 34.2~38.3、33.1~38.3、33.4~36.3°C,平均分别为 36.0、36.0 和 35.1°C。由图 1b 可见,各处理大白菜生长期间(30d)实验温室内日光合有效辐射在 3.8~19.4 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在 3 期实验中,光合有效辐射的逐日变化过程差异较明显,日光合有效辐射区间分别为 3.84~19.37、3.84~17.71、8.03~19.05 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,平均值分别为 13.87、13.22、14.96 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

分析图 1a 和图 1b 可知, T1 处理日平均气温、日光合有效辐射变化相对平稳,后期变化幅度加大;

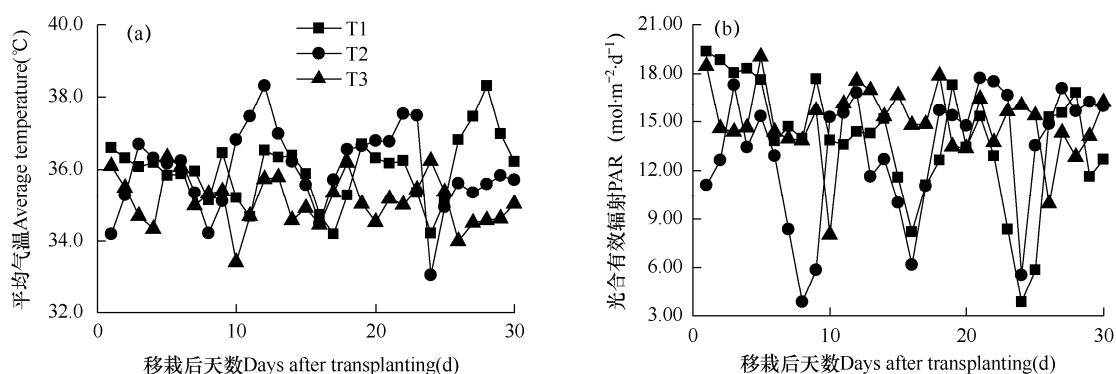


图 1 温室大白菜生长期日平均气温和日光合有效辐射的变化过程

Fig. 1 Variation course of the daily average temperature and photosynthetically active radiation during the growing period of Chinese cabbage in greenhouse

注：实验分三期进行，第一期（T1）为 2020 年 6 月 16 日（移栽）–7 月 16 日（收获），第二期（T2）为 7 月 2 日（移栽）–8 月 1 日（收获），第三期（T3）为 8 月 2 日（移栽）–9 月 1 日（收获）。下同。

Note: The experiments were conducted in three phases. The first phase (T1) was from June 16, 2020 (transplanting) to July 16, 2020 (harvest), the second phase (T2) was from July 2 (transplanting) to August 1, 2020 (harvest), and the third phase (T3) was from August 2 (transplanting) to September 1, 2020 (harvest). The same as below.

T2 处理日平均气温、日光合有效辐射变幅相对较大；而 T3 处理日平均气温、日光合有效辐射变化较平稳但日平均气温总体相对较低，日光合有效辐射总体相对较高。各处理大白菜生育期内日平均气温与日光合有效辐射的升降趋势基本一致。以 T2 为例，T2 处理日平均气温与日光合有效辐射的阶段极大值均出现在第 3、12、22 天，阶段性极小值均出现在第 8、16、24 天；T1、T3 处理日平均气温与日光合有效辐射的变化也呈现类似特征，即各期实验期间的日平均气温与日光合有效辐射的变化方向较同步。

2.1.2 光温效应

利用三期实验的气象数据和式（1）–式（6）分别计算各处理下大白菜生长期间的日光温效应。经式（1）、（2）计算，T1、T2 和 T3 处理中的每日温度热效应分别为 0.24~0.68、0.24~0.73 和 0.35~0.72。经式（3）、（4）计算，T1、T2 和 T3 处理的每日光效应分别为 0.98~1.00、0.98~1.00 和 1.00。经式（5）、（6）计算，T1、T2 和 T3 处理每日光温效应分别为 0.24~0.66、0.24~0.73 和 0.35~0.72，各处理平均每日光温效应分别为 0.41、0.42 和 0.47，累积光温效应 LTF 分别为 12.35、12.48 和 14.14。

由图 2 可见，在三期实验中，光温效应的逐日变化过程稍有差异。总体上看，T1 处理日光温效应

变化较平稳，后期变化幅度增大，T2 处理变幅相对较大，T3 处理变化较平稳。结合可知，T1、T2 和 T3 每日光温效应的变化幅度与日平均气温和日光合有效辐射的变化幅度较一致，但变化方向有差别。以 T2 为例，T2 处理中日光温效应的阶段性极大值出现在第 8、16、24 天，阶段性极小值出现在第 3、12、23 天，这与 T2 处理中日平均气温和日光合有效辐射阶段性极大值和极小值出现的时间基本相反；T1、T3 处理中日光温效应的变化也具有类似特征，说明 LTF 对气温和光合有效辐射原值的修正作用较明显。

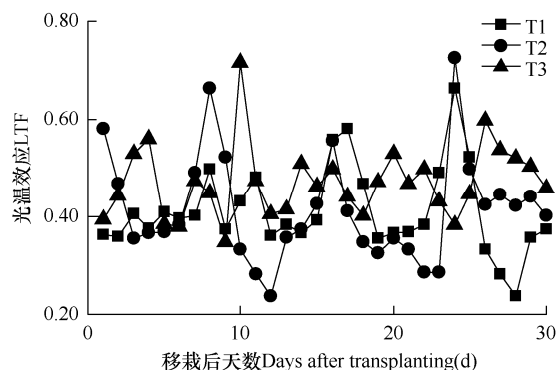


图 2 温室大白菜生长期实验日光温效应的变化过程

Fig. 2 Variation course of the daily LTF (Light and Temperature Function) during the growing period of Chinese cabbage in greenhouse

2.1.3 主要生理特性、营养品质光温效应 (LTF) 模型的建立

对 T1 处理累积光温效应与各生理特性、营养品质指标之间的关系进行拟合, 结果见图 3 和表 1。同理, 根据式 (7)–式 (11), 应用 T1 处理气象数据计算 TEP、GDD, 将其分别与大白菜各生理特性、营养品质指标的关系进行拟合, 结果见表 1。

由图 3 可见, 大白菜各生理特性、营养品质指标主要表现为随 LTF 的增加而呈单峰曲线和“S”曲线、“N”曲线型的发展趋势。具体来看, 在营养品质方面, 可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C、硝

酸盐含量呈现随 LTF 的增加先上升而后下降的趋势; 其中, 前三者的变化表现为单峰曲线型, 硝酸盐含量在实验结束时略微升高, 表现为“N”曲线型。纤维素的变化表现为随 LTF 的增加而持续平稳增长的“S”曲线。在生理特性方面, 根系活力、叶绿素 (a、b、a+b)、类胡萝卜素呈现出随 LTF 的增加而增长的“S”曲线型变化, 其中, 叶绿素 (a、b、a+b) 和类胡萝卜素的生长速度表现为明显的由慢至快再变慢的态势, 而根系活力在实验后期的减慢程度较弱。

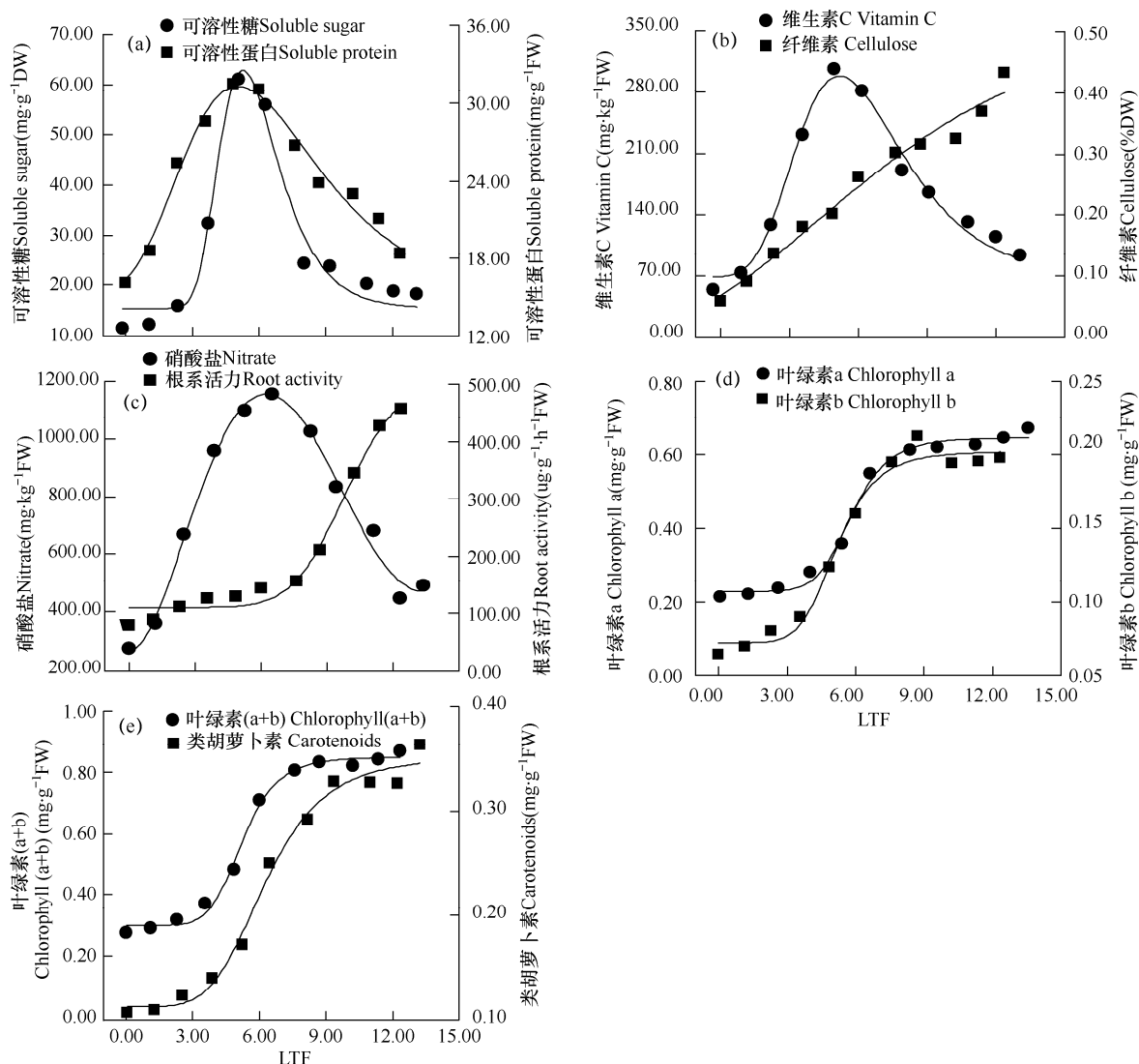


图 3 大白菜生理特性、营养品质与累积光温效应 (LTF) 的关系

Fig. 3 Relationship between physiological characteristics and nutritional quality of Chinese cabbage and LTF

注: DW 干重, FW 鲜重, 下同。

Note: DW is dry weight, FW is fresh weight. The same as below.

表 1 大白菜生理特性、营养品质与光温效应（LTF）、辐热积（TEP）和积温（GDD）的拟合结果

Table 1 Relationship between physiological characteristics and nutritional quality of Chinese cabbage and LTF(light and temperature function), TEP(thermal effectiveness and photosynthetically active radiation), GDD(growing degree days)

指标 Index	方法 Method	方程 Equation	R ²
可溶性糖 Soluble sugar (mg·g ⁻¹ DW)	LTF	Y=15.391+47.502EXP { -EXP[(5.047-LTF)/1.241]+[(5.047-LTF)/1.241]+1 }	0.954
	TEP	Y=14.924+48.076EXP { -EXP[(79.403-TEP)/16.383]+((79.403-TEP)/16.383)+1 }	0.937
	GDD	Y=15.305+48.207EXP { -EXP[(384.623-GDD)/88.495]+((384.623-GDD)/88.495)+1 }	0.929
可溶性蛋白 Soluble protein(mg·g ⁻¹ FW)	LTF	Y=15.188+16.063EXP { -EXP[(5.062-LTF)/3.045]+ [(5.062-LTF)/3.045]+1 }	0.964
	TEP	Y=15.313+15.895EXP { -EXP[(75.601-TEP)/39.679]+ [(75.601-TEP)/39.679]+1 }	0.969
	GDD	Y=15.606+15.616EXP { EXP[(380.142-GDD)/213.926]+ [(380.142-GDD)/213.926]+1 }	0.969
维生素 C Vitamin C (mg·kg ⁻¹ FW)	LTF	Y=68.737+229.627EXP { -EXP[(5.088-LTF)/2.144]+ [(5.088-LTF)/2.144]+1 }	0.978
	TEP	Y=64.622+232.857EXP { -EXP[(78.411-TEP)/28.380]+ [(78.411-TEP)/28.380]+1 }	0.976
	GDD	Y=70.546+228.958EXP { -EXP[(384.377-GDD)/150.201]+ [(384.377-GDD)/150.201]+1 }	0.970
纤维素 Cellulose (%DW)	LTF	Y=0.517EXP[-EXP(-0.167LTF+0.703)]	0.972
	TEP	Y=0.747EXP[-EXP(-0.009TEP+0.894)]	0.979
	GDD	Y=0.539EXP[-EXP(-0.002GDD+0.742)]	0.979
硝酸盐 Nitrate (mg·kg ⁻¹ FW)	LTF	Y=265.756-11.275LTF+130.250LTF ² -26.996LTF ³ +1.875LTF ⁴ -0.043LTF ⁵	0.980
	TEP	Y=270.018-3.022TEP+0.455TEP ² -0.004TEP ³ -0.004×10 ⁻³ TEP ⁴ +0.006×10 ⁻⁵ TEP ⁵	0.988
	GDD	Y=268.939-0.779GDD+0.026GDD ² -0.007×10 ⁻² GDD ³ +0.006×10 ⁻⁵ GDD ⁴ -0.002×10 ⁻⁸ GDD ⁵	0.989
根系活力 Root activity (ug·g ⁻¹ ·h ⁻¹ FW)	LTF	Y=-424.381/[1+(LTF/10.009) ^{7.577}]+535.189	0.980
	TEP	Y=-371.709/[1+(TEP/135.067) ^{13.661}]+486.586	0.972
	GDD	Y=-382.677/[1+(GDD/710.104) ^{8.992}]+494.555	0.977
叶绿素 a Chlorophyll a (mg·g ⁻¹ FW)	LTF	Y=-0.419/[1+(LTF/5.261) ^{7.084}]+0.646	0.988
	TEP	Y=-0.420/[1+(TEP/83.515) ^{8.448}]+0.648	0.989
	GDD	Y=-0.423/[1+(GDD/403.498) ^{6.992}]+0.650	0.990
叶绿素 b Chlorophyll b (mg·g ⁻¹ FW)	LTF	Y=-0.130/[1+(LTF/5.190) ^{6.061}]+0.202	0.980
	TEP	Y=-0.131/[1+(TEP/82.497) ^{7.183}]+0.203	0.979
	GDD	Y=-0.131/[1+(GDD/396.531) ^{6.217}]+0.203	0.977
叶绿素(a+b) Chlorophyll (a+b) (mg·g ⁻¹ FW)	LTF	Y=-0.550/[1+(LTF/5.247) ^{6.678}]+0.850	0.992
	TEP	Y=-0.552/[1+(TEP/83.318) ^{7.975}]+0.852	0.992
	GDD	Y=-0.554/[1+(GDD/402.131) ^{6.735}]+0.853	0.993
类胡萝卜素 Carotenoids (mg·g ⁻¹ FW)	LTF	Y=-0.240/[1+(LTF/5.854) ^{4.669}]+0.352	0.984
	TEP	Y=-0.243/[1+(TEP/91.570) ^{5.613}]+0.356	0.987
	GDD	Y=-0.240/[1+(GDD/445.777) ^{5.036}]+0.353	0.987

由表 1 可见，在营养品质方面，可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 随 LTF 的增长趋势可用 Extreme 函数拟合，纤维素的增长趋势可用 Gompertz 函数拟合，硝酸盐的增长趋势可用 Poly5 函数拟合；在生理特性方面，根系活力、叶绿素（a、b、a+b）和类胡萝卜素的生长趋势可用 Logistic 函数拟合。LTF 拟合模型的 R² 为 0.980~0.992，模型拟合度较佳。在各项生理特性和营养品质的拟合上，基于 TEP、GDD 的拟合函数与对应的基于 LTF 的拟合函数类似，但

具体参数不同。TEP、GDD 拟合模型的 R² 为 0.929~0.993，模型拟合度也较好。

2.2 光温效应（LTF）模型的检验

利用 T2、T3 处理累积光温效应，根据表 1 的各项 LTF 拟合函数计算不同处理下大白菜生理特性与营养品质指标模拟值，并观测不同处理下的生理特性与营养品质的实测值。模拟值与实测值的对比结果见图 4 和表 2。同时，与 TEP、GDD 模型的检验结果进行比较。

由图 4 可见, LTF 模型模拟值与实测值较吻合, 其模拟值贴近 1:1 直线; TEP 模型的模拟值则明显地偏离 1:1 直线; GDD 模型介于 LTF 和 TEP 之间。即, 从模拟值与 1:1 直线的贴近程度来看, LTF 模型优于 GDD 模型, GDD 模型优于 TEP 模型。其中, 相对地, 在 TEP 模型上, T3 处理模拟值与实测

值较接近; T2 处理的可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C、硝酸盐的模拟值滞后于实测值的先上升后下降趋势, 表现为先低于后高于实测值; T2 的纤维素、根系活力、叶绿素(a、b、a+b)、类胡萝卜素的模拟值低于实测值, 这可能是因为 T2 的光合有效辐射较弱, TEP 积累较少导致。

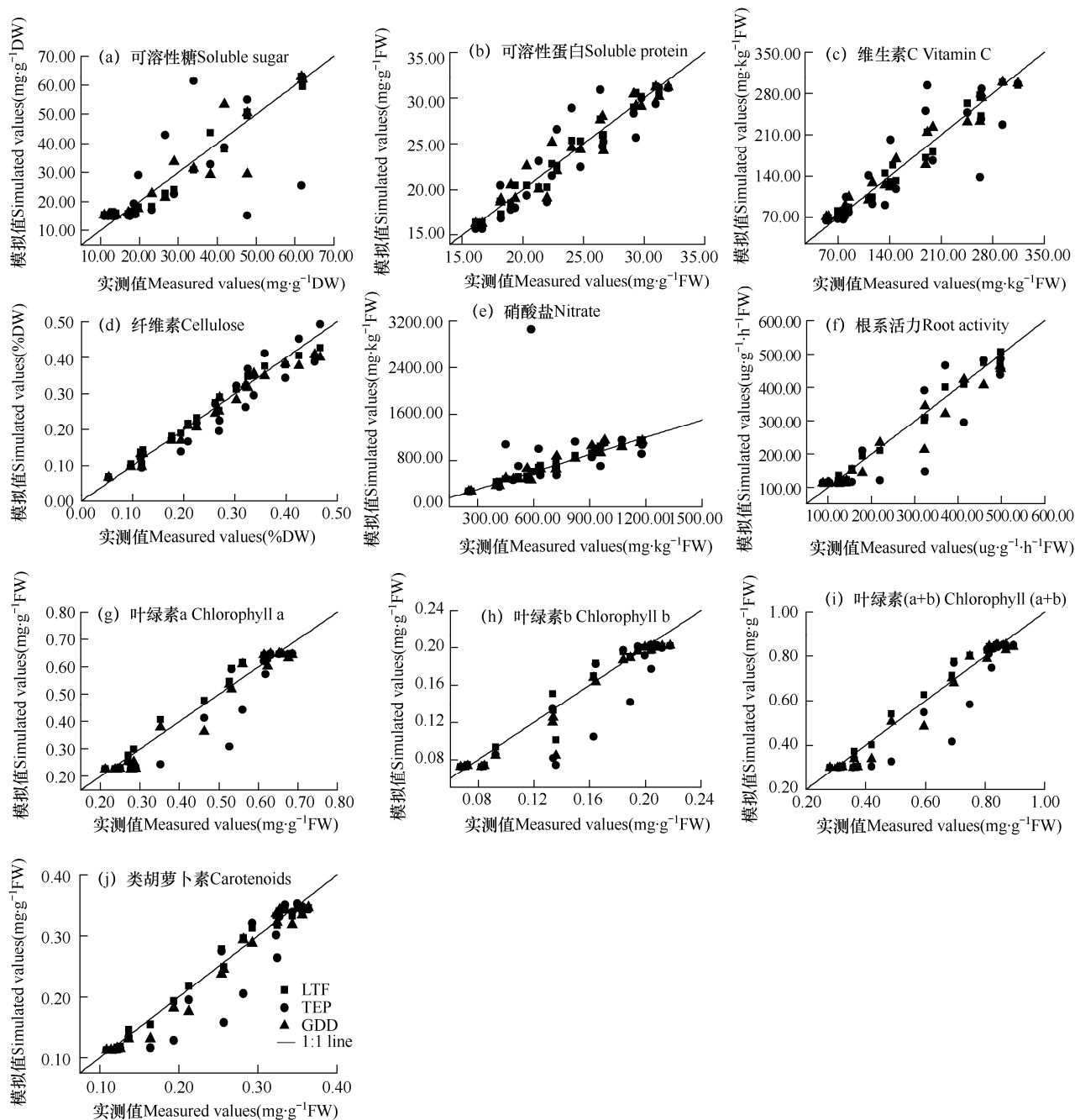


图 4 大白菜生理特性、营养品质的模拟值与实测值比较

Fig. 4 Comparison between simulated and measured values of physiological characteristics and nutritional quality of Chinese cabbage

表 2 三种模型的检验结果

Table 2 Test results of three models

指标 Index	拟合方法 Fitting method	R ²	RMSE	RE(%)	指标 Index	拟合方法 Fitting method	R ²	RMSE	RE(%)
可溶性糖 Soluble sugar	LTF	0.958	3.267	11.99	叶绿素 a	LTF	0.969	0.033	7.06
	TEP	0.405	12.334	45.28	Chlorophyll a	TEP	0.904	0.059	12.63
	GDD	0.871	5.749	21.10		GDD	0.966	0.035	7.42
可溶性蛋白 Soluble protein	LTF	0.972	0.860	3.59	叶绿素 b	LTF	0.956	0.012	7.89
	TEP	0.804	2.367	9.87	Chlorophyll b	TEP	0.840	0.023	15.53
	GDD	0.921	1.401	5.84		GDD	0.954	0.012	8.20
维生素 C Vitamin C	LTF	0.970	14.121	8.82	叶绿素(a+b)	LTF	0.976	0.038	6.08
	TEP	0.697	45.923	28.67	Chlorophyll	TEP	0.901	0.079	12.73
	GDD	0.954	17.163	10.71	(a+b)	GDD	0.974	0.040	6.40
纤维素 Cellulose	LTF	0.978	0.017	6.79	类胡萝卜素	LTF	0.986	0.012	4.95
	TEP	0.911	0.039	15.25	Carotenoids	TEP	0.891	0.033	14.00
	GDD	0.975	0.018	7.13		GDD	0.979	0.014	5.98
硝酸盐 Nitrate	LTF	0.975	46.752	6.47	根系活力 Root	LTF	0.985	17.443	7.99
	TEP	0.048	569.677	78.88	activity	TEP	0.826	60.046	27.52
	GDD	0.932	78.740	10.90		GDD	0.953	28.374	13.00

由表 2 可见，LTF 模型模拟值与实测值之间的 R^2 为 0.956~0.986，RMSE 为 0.012~46.752，RE 为 3.59%~11.99%，说明 LTF 模型模拟值对实测值的拟合度和预测精度均较佳。LTF 模型模拟值与实测值之间的 R^2 、RMSE、RE 分别为 TEP 模型的 107.19%~2031.25%，8.21%~55.93%，8.20%~55.90%，为 GDD 模型的 100.21%~109.99%，56.83%~100.00%，56.82%~96.22%。每项生理特性和营养品质的 R^2 表现为 LTF 模型>GDD 模型>TEP 模型，RMSE 和 RE 则表现为 LTF 模型<GDD 模型<TEP 模型。从模拟值对实测值的拟合度和预测精度来看，LTF 模型优于 GDD 模型，GDD 模型优于 TEP 模型。

3 结论与讨论

3.1 结论

LTF 模型能较精准地预测大白菜的主要生理特性、营养品质指标，对各项生理特性、营养品质的模拟值与实测值的 $R^2>0.956$ ， $RMSE<46.752$ ， $RE<11.99\%$ 。对各项生理特性和营养品质的模拟模型的 R^2 表现为 LTF>GDD>TEP，RMSE 和 RE 表现为 LTF<GDD<TEP。在模型拟合度和模拟精度上，LTF 模型优于 GDD 和 TEP 模型，且 GDD 模型优于 TEP 模型。

3.2 讨论

本研究发现，大白菜叶片可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 表现为随 LTF 的增加呈先上升后下降的 Extreme 函数的单峰曲线规律。在第 5 次取样时，该 3 项指标达到最大值，此时，大白菜仍处苗期，大白菜营养品质较佳。这与原让花等^[18]的大白菜苗期营养价值较高的研究结果相类似。硝酸盐含量呈现随 LTF 的增加而积累、降低、再积累的 Poly5 函数的“N”字形变化规律，这与王景安等^[19]在叶菜中的研究结果类似。硝酸盐在第 6 次取样时达到最大值，低于中国无公害叶菜类蔬菜的硝酸盐含量标准^[20]。纤维素则表现为随 LTF 的增加而不断增长的 Gompertz 函数的“S”型变化规律。前人研究表明，大白菜风味与可溶性糖、可溶性蛋白呈正相关，与纤维素呈负相关^[21]，表明大白菜苗期既有较高的营养，又有不错的风味。

本研究同时表明，根系活力、叶绿素(a、b、a+b)和类胡萝卜素表现为随 LTF 的增加而增长，且速度由慢至快的 Logistic 函数的“S”型变化规律，这与经典的植物“S”型生长模式一致^[16]。相对地，实验结束时，根系活力仍保持较强劲的增长速度，叶绿素(a、b、a+b)和类胡萝卜素则进入缓慢增长阶段。光合色素是反映叶片光合强度的重要指标^[2]，根系活

力是根的生长情况和活力水平的指征^[22]。实验后期大白菜根系活力和光合色素进入缓慢增长阶段的时间先后,表明了实验大白菜叶片老化速度快于根系老化速度。同时,叶绿素含量的稳定性是植物抗热性的一项重要生理指标^[2],实验期间叶绿素含量始终保持增长趋势,说明实验气温未对大白菜产生明显的热胁迫。

LTF 模型综合考虑了气温和光合有效辐射的影响,避免了 GDD 模型中单因素的不足,且将气温和光合有效辐射转化为温度热效应和光效应,并将取值确定在 0~1 之间,降低了 TEP 模型中光合有效辐射原值的作用;构建了温度和光合有效辐射与作物生长的非线性关系,比 TEP 和 GDD 法机理性更强,对作物生长模拟也较为准确^[10]。前人研究表明^[11],GDD 模型主要应用于大田作物模拟,TEP 模型在番茄、黄瓜等作物模拟上效果良好。本研究发现,温室环境下大白菜生长 GDD 模型预测精度优于 TEP 模型。这可能是因为实验温室中气温和光合有效辐射的变化方向较同步,TEP 模型中未考虑两者的叠加效应,且温度对叶菜类蔬菜生长的影响更大^[16]。

本研究仅选取“新早熟 5 号”作为实验材料,在适宜的水肥条件下进行研究,并应用 1 期的实验数据构建基于光温效应的模拟模型。今后可进一步研究光温条件对其它大白菜品种生理指标的影响,对模型参数进行补充和完善。

参考文献 References

- [1] 杨发斌.不同耐热性大白菜响应热胁迫的差异分析[D].济宁:曲阜师范大学,2018.
Yang F B.Differences in response to heat stress of Chinese cabbage with different heat tolerance[D].Jining:Qufu Normal University,2018.(in Chinese)
- [2] 衣宁.温度胁迫下大白菜生理生化变化研究[D].济宁:曲阜师范大学,2015.
Yi N.Physiological and biochemical changes of Chinese cabbage under temperature stress[D].Jining:Qufu Normal University,2015.(in Chinese)
- [3] 王玉霞,徐坤,米庆华,等.转光膜的温光效应及其对春大白菜生长发育的影响[J].中国蔬菜,2006(9):12-15.
Wang Y X,Xu K,Mi Q H,et al.Effect of spectrum conversion film on temperature,light and growth of Chinese cabbage[J].China Vegetables,2006(9):12-15.(in Chinese)
- [4] 白晨熙.不同大白菜品种耐热性鉴定[D].泰安:山东农业大学,2019.
Bai C X.Identification of heat tolerance of different Chinese cabbage varieties[D].Taian:Shandong Agricultural University,2019.(in Chinese)
- [5] 郭长禄.苗期食用大白菜耐低温鉴定方法的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2001.
Guo C L.Study on the method of evaluating the tolerance to low temperature of Chinese cabbage(*Brassica campestris* ssp.) collected during its seeding period[D].Harbin:Northeast Agricultural University,2001.(in Chinese)
- [6] 孟凡珍.不同季节生态型大白菜对温度胁迫的生理响应[D].泰安:山东农业大学,2002.
Meng F Z.The physiological response of different Chinese cabbages in seasonal ecotype to temperature stress[D].Taian:Shandong Agricultural University,2002.(in Chinese)
- [7] 李晓锋,侯瑞贤,朱玉英,等.高温胁迫对大白菜抗氧化系统酶及可溶性蛋白质和热稳定蛋白质的影响[J].上海农业学报,2019,25(4):26-30.
Li X F,Hou R X,Zhu Y Y,et al.Effects of heat stress on antioxidant enzymes,soluble protein and heat-stable protein of Chinese cabbage[J].Acta Agriculturae Shanghai,2019,25(4):26-30.(in Chinese)
- [8] 袁丁,秦占军,武占会,等.日光温室遮阳与喷雾降温对越夏快菜生长及品质的影响[J].中国蔬菜,2019(7):62-66.
Yuan D,Qin Z J,Wu Z H,et al.Effect of estival screen-shading and spray cooling on growth and quality of over summer Chinese cabbage in solar greenhouse[J].China Vegetables,2019(7):62-66.(in Chinese)
- [9] 谭文,杨再强,李军.基于温光效应的小白菜营养品质模拟模型研究[J].中国农业气象,2016,37(1):59-67.
Tan W,Yang Z Q,Li J.Simulation of nutrient quality of pakchoi based on temperature-light function[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2016,37(1):59-67.(in Chinese)
- [10] 温永菁,李春,董朝阳,等.钟模型在日光温室番茄发育进程模拟中的适应性探讨[J].中国农业气象,2020,41(10):622-631.
Wen Y J,Li C,Dong C Y,et al.Research on the simulation model of tomato development period in solar greenhouse based on clock model method[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2020,41(10):622-631.(in Chinese)
- [11] 徐超,王明田,杨再强,等.苗期高温对草莓生育期的影响

- 及其模拟[J].中国农业气象,2020,41(10):644-654.
- Xu C,Wang M T,Yang Z Q,et al.Effect of high temperature in seedling stage on phenological stage of strawberry and its simulation[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2020,41(10):644-654.(in Chinese)
- [12] 张志良,瞿伟菁,李小方.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2009.
- Zhang Z L,Qu W J,Li X F.Experimental guide for plant physiology[M].Beijing:Higher Education Press,2009.(in Chinese)
- [13] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- Wang X K.Experiments principles and techniques of plant physiology and biochemistry[M].Beijing:Higher Education Press,2006.(in Chinese)
- [14] 解胜利,刘娟娟,苟建霞.果蔬中抗坏血酸含量的测定[J].湖北农业科学,2012,51(1):169-171.
- Xie S L,Liu J J,Gou J X.Determination of ascorbic acid in vegetables and fruits[J].Hubei Journal of Agricultural Sciences ,2012,51(1):169-171.(in Chinese)
- [15] 张宪政.植物叶绿素含量测定:丙酮乙醇混合液法[J].辽宁农业科学,1986(3):26-28.
- Zhang X Z.Determination of chlorophyll content in plants by acetone ethanol mixture method[J].Liaoning Agricultural Sciences,1986(3):26-28.(in Chinese)
- [16] 雷波.水培生菜生长发育模型的建立[D].武汉:华中农业大学,2009.
- Lei B.Models to estimate growth and development of hydroponic lettuce[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2009. (in Chinese)
- [17] Larsen R U,Persson L.Modelling flower development in greenhouse chrysanthemum cultivars in relation to temperature and response group[J].Scientia Horticulturae,1999, 80:73-89.
- [18] 原让花,王广印,原连庄,等.苗球兼用大白菜苗菜与球菜营养品质分析及评价[J].北方园艺,2013(8):13-16.
- Yuan R H,Wang G Y,Yuan L Z,et al.Nutritional quality analysis and evaluation of seedling and heading Chinese cabbage[J].Northern Horticulture,2013(8):13-16.(in Chinese)
- [19] 王景安,程炳嵩.叶菜类不同生育期体内硝酸盐、亚硝酸盐及维生素 C 含量的变化[J].河北农业技术师范学院学报,1989,3(2):33-38.
- Wang J A,Cheng B S. Changes of contents of nitrate, nitrite and Vitamin C at different growth stages in leaf vegetables[J].Journal of Hebei Normal University of Science & Technology,1989,3(2):33-38.(in Chinese)
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB 18406.1-2001 农产品安全质量无公害 蔬菜安全要求[S].北京:中国标准出版社,2001.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine,China.GB 18406.1-2001 Safety qualification for agricultural product:safety requirements for non-environmental pollution vegetable[S].Beijing:China Standard Press,2001.(in Chinese)
- [21] 高飞.不同品种大白菜生物学性状和品质比较研究[D].杭州:浙江农林大学,2013.
- Gao F.Comparative study on biological traits and quality of different Chinese cabbage cultivars[D].Hangzhou:Zhejiang A&F University,2013.(in Chinese)
- [22] 陆海洋,刘晓英,司聪聪,等.不同光密度对不结球白菜的生长与品质的影响[J].植物生理学报,2015,51(6):909-915.
- Lu H Y,Liu X Y,Si C C,et al.Effects of different PPFD on growth and quality of non-heading Chinese cabbages[J]. Plant Physiology Journal,2015,51(6): 909-915. (in Chinese)