

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.12.004

徐超,高芮,王明田,等.苗期高温对草莓果实营养品质影响的模糊综合评价及模型建立[J].中国农业气象,2020,41(12):785-793

苗期高温对草莓果实营养品质影响的模糊综合评价及模型建立*

徐 超¹, 高 芮¹, 王明田^{3,4**}, 杨再强^{1,2**}, 韩 玮¹, 郑盛华⁴

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学滨江学院, 无锡 214000; 3. 四川省气象台, 成都 610091; 4. 农业农村部西南山区农业环境重点实验室, 成都 610091)

摘要: 以草莓品种“红颜”为研究对象, 于 2018 年和 2019 年对草莓苗期进行不同高温和持续天数的双因素随机区组实验, 日最高气温/日最低气温设置 32℃/22℃、35℃/25℃、38℃/28℃和 41℃/31℃共 4 个水平, 以 28℃/18℃为对照, 高温胁迫天数包括 2、5、8 和 11d 共 4 个处理, 高温处理结束后将草莓苗移植到 Venlo 型玻璃温室进行正常栽培实验。基于各处理下首批商品果实内在品质指标的差异分析, 利用模糊综合评价方法确定各实验处理的综合得分, 分析其与不同胁迫温度和持续天数的关系, 构建果实内在品质综合评价模型, 以探究苗期高温对温室草莓果实内在品质的影响。结果表明, 高温下不同处理天数对草莓果实维生素 C、可溶性糖、可滴定酸和花青苷含量的影响不尽相同, 4 个草莓内在品质的权重大小分别是, 可滴定酸 (0.33) > 花青苷 (0.25) > 维生素 C (0.23) > 可溶性糖 (0.19)。模糊综合评价的得分显示, 35℃下处理 8d 和 11d 以及 38℃下处理 2d 和 5d 果实内在品质的综合得分最高 (均大于 0.8), 35℃下处理 2d 和 5d 以及 32℃处理下得分居中 (0.6~0.8), 38℃下处理 8d 和 11d 以及 41℃处理下得分最低 (0~0.6)。研究构建的综合内在品质模型对温室草莓综合品质模拟值与实测值的决定系数 (R^2) 为 0.86, 均方根误差 (RMSE) 为 0.01, 相对误差 (RE) 为 0.06%。因此, 草莓苗期一定程度的高温处理 (35℃下 11d 以内或 38℃下 5d 以内) 有助于成熟果实综合内在品质的提高, 建立的模型可以很好地预测苗期高温下温室草莓的综合内在品质。

关键词: 草莓; 苗期高温; 果实品质; 评价模型; 模糊评价法

Fuzzy Comprehensive Evaluation and Model Establishment of the Effect of High Temperature in the Seedling Stage on the Nutritional Quality of Strawberry Fruit

XU Chao¹, GAO Rui¹ WANG Ming-tian^{3,4}, YANG Zai-qiang^{1,2}, HAN Wei¹, ZHENG Sheng-hua⁴

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Binjiang College of Nanjing University of Information Science and Technology, Wuxi 214000; 3. Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610091; 4. Water-Saving Agriculture in Southern Hill Area Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610091)

Abstract: In order to study the effect of high temperature at seedling stage on the intrinsic quality of strawberry fruits in the greenhouse, and then to conduct comprehensive evaluation of different experimental treatments to establish a comprehensive evaluation model of intrinsic quality of strawberry fruits. In 2018 and 2019, strawberry seedlings were stressed with different high temperature (32, 35, 38 and 41℃) and different stress days (2, 5, 8 and 11d), and then transplanted to Venlo glass greenhouse for normal cultivation experiments, with normal greenhouse

* 收稿日期: 2020-03-26 ** 通讯作者王明田, E-mail: wangmt0514@163.com; 杨再强, E-mail: yzq@nuist.edu.cn
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD1002202); 2020 年度江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX20_0928);
四川省农业气象指标体系研究及应用项目 (省重点实验室 2018-重点-05); 农业农村部西南山区农业环境重点实验室开放项目 (AESMA-OPP-2019006); 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20180810)
第一作者联系方式: 徐超, E-mail: amxuchao@foxmail.com

cultivation as a control. Based on the differences in fruit intrinsic quality indicators under each treatment, the comprehensive score of each experimental treatment determined by the fuzzy comprehensive evaluation method, and by analyzing the relationship between the comprehensive score and different stress temperatures and stress days, a comprehensive evaluation model of fruit intrinsic quality was constructed. Among them, the data obtained in 2018 were used for model construction, and in 2019 were used for model verification. The results showed that the effects of different stress days on the vitamin C, soluble sugar content, titratable acid content and anthocyanin of strawberry fruits were different under high temperature. The weights of the four intrinsic qualities of strawberries are titratable acid (0.33)> anthocyanin (0.25)> vitamin C (0.23)> soluble sugar (0.19). The score of the fuzzy comprehensive evaluation showed that the comprehensive score of the intrinsic quality of the fruit was highest at 8 days and 11 days at 35°C, and 2 days and 5 days at 38°C (all greater than 0.8). The comprehensive fruit quality scores were medium (between 0.6 and 0.8) at 2d and 5d at 35°C and 32°C treatment, and the lowest comprehensive fruit quality scores (between 0 and 0.6) under 38°C treatments for 8 days and 11 days and 41°C treatment. The determination coefficients (R^2) of the built-in comprehensive quality model for the simulated and measured values of greenhouse strawberry comprehensive quality were 0.86, the root mean square error (RMSE) was 0.01, and the relative error (RE) was 0.06%. Therefore, a certain degree of high temperature treatment (within 11 days at 35°C or within 5 days at 38°C) in the greenhouse strawberry seedling stage will help to improve the comprehensive intrinsic quality and the model established can predict the comprehensive intrinsic quality of the greenhouse strawberry under high temperature at the seedling stage, which has a guiding significance for the regulation of the strawberry greenhouse temperature environment.

Key words: Strawberry; High temperature in the seedling stage; Fruit quality; Evaluation model; Fuzzy evaluation method

草莓以其生长周期短, 投资见效快和经济效益高等优势而成为发展最快的新兴产业之一。中国草莓的种植面积呈逐年递增趋势, 2017 年全国草莓种植面积 14.13 万 hm^2 , 产量高达 375.3 万 t, 产值达到 600 亿元以上^[1-2]。但是由于生产设施简陋, 环境调控能力差, 设施内常遇到高温等灾害, 严重制约了草莓的生长发育, 进而影响果实品质^[3]。

品质是决定商品市场价值的关键因素^[4]。草莓品质包括外在品质(大小、颜色等)和内在品质(可溶性糖、维生素和酸含量等)^[5]。关于温度对果实内在品质的影响国内外已有报道。Wang 等^[3]研究表明, 草莓营养生长期高温会导致果实品质下降, 包括果实内可溶性固形物(SSC)、可滴定酸(TA)和维生素 C(VC)含量。杨洋等^[3]研究温度对葡萄品质的影响表明, 夜间高温除降低果实总酚外, 对可溶性糖和类黄酮的积累无影响。薛思嘉等^[7]研究表明, 花期高温降低了黄瓜维生素 C 含量, 而可溶性糖的含量随着温度升高呈先上升后下降的趋势。可见, 温度对不同内在品质指标的影响不尽相同。内在品质是一个综合概念, 当需要对果实多种品质指标进行

综合评价时, 不同指标之间又相互交叉和重叠, 给定量和综合评价品质指标带来了挑战^[8-9]。

目前, 针对苗期高温对草莓果实内在品质的影响已有报道, 但是草莓品质指标综合评价的方法以及苗期高温对综合内在品质的影响模型尚未见到。本研究通过草莓两个生长季的实验, 使用 2018 年的数据定量分析苗期高温对设施草莓果实内在品质的影响, 使用模糊评价来计算不同温度下果实内在品质的综合模糊系数, 构建综合模糊系数与不同温度和不同胁迫天数的模型, 并使用 2019 年实验数据对模型进行检验, 旨在为设施草莓温室环境品质调控提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 实验地点和材料

实验在南京信息工程大学农业气象试验站 Venlo 型玻璃温室进行, 温室的南北长度为 30m, 东西向由 12 个跨组成, 每跨为 6m, 檐高和脊高分别为 4m 和 4.73m, 温室内加热系统、灌溉系统、帘幕开展、通风窗的开张均由计算机自动控制。实验栽培土壤为沙壤土, pH6.5 ~ 6.8, 有机质含量

176.58mg·kg⁻¹, 有效氮、有效磷和有效钾含量分别为 70.52、30.15 和 179.25mg·kg⁻¹。实验期间土壤水分、肥料按常规栽培进行管理。

实验材料为草莓品种“红颜”(Fragaria×ananassa Duch. 'Benihoppe'), 由山东果树种植基地提供。

1.2 高温处理

实验于 2018 年 9 月–2019 年 1 月和 2019 年 9 月–2020 年 1 月分两批次在南京信息工程大学人工气候室(PGC-FLEX, 加拿大) 进行, 试验设计参考韦婷婷等^[10]方法并适当改进, 在草莓苗期 9~12 片真叶, 叶长≥5cm, 花芽分化完成后进行不同持续日数的高温处理。根据韦婷婷等^[11]的方法, 利用 BP 神经网络逐时模拟南京地区气温, 并以此设置气候室的温控程序(图 1), 日最高气温设置为 32、35、38 和 41℃共 4 个水平, 日最高温与日最低温的温差均设为 10℃, 以最高温/最低温 28℃/18℃为对照。处理期间空气相对湿度设置 65%~70%, 光周期为 12h/12h, 以 6:00–18:00 为白天, 光照强度为 800μmol·m⁻²·s⁻¹。实验草莓幼苗系盆栽, 盆高×上口径×下口径为 15cm×12cm×8cm, 所用土壤与栽培土壤一致。高温处理持续日数分别设置为 2、5、8 和 11d, 在各高温处理结束后将草莓苗去盆移栽至 Venlo 型玻璃温室, 定植密度为 8 株·m⁻²。故实验 4 个高温处理, 4 个持续天数, 共计 16 组。每组处理 3 个重复, 每个重复 10 株, 共计 480 株草莓苗。

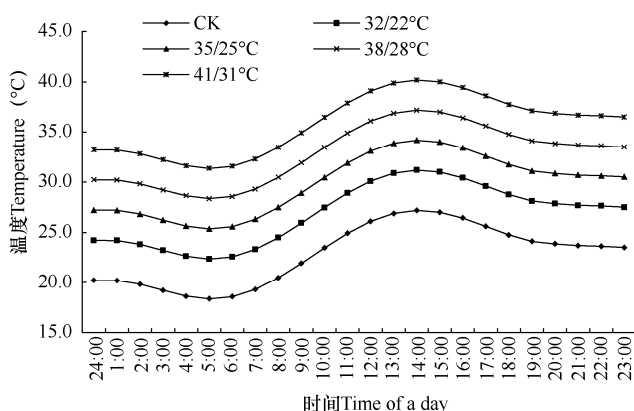


图 1 人工气候室日内温度变化过程

Fig. 1 Variation course of daily temperature in artificial climate chamber

1.3 样本采集与测定

取首批达商品果采收标准的草莓果实进行测定。果实营养品质(维生素 C、可溶性总糖、可滴定

酸、花青苷)测定方法参考文献[12]。

1.4 营养品质综合评价模型

1.4.1 模糊矩阵综合评判

(1) 建立模糊评判矩阵

实验共观测草莓果实 4 个内在品质指标, $U = (U_1, U_2, \dots, U_4)$, 每个品质指标有 16 个处理 $V = (V_1, V_2, \dots, V_{16})$, V_1 – V_4 分别代表日最高气温 32℃持续 2、5、8 和 11d 处理组, V_5 – V_8 、 V_9 – V_{12} 、和 V_{13} – V_{16} 分别代表日最高气温 35、38 和 41℃下持续 2、5、8 和 11d 处理组, 则草莓果实内在品质观测结果的模糊评价矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} & V_1 & V_2 & \cdots & V_{16} \\ U_1 & r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ U_2 & r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ U_n & r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2) 评价指标归一化处理

对原始数据 R 进行标准化处理, 即对样本中元素 $r_{ij}(i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, \dots, 16)$ 进行标准化处理, 以克服评价尺度的不统一。具体标准化方程为

$$r_{nm} = (r_{nm} - \bar{r}_m) / S_j \quad (2)$$

$$\bar{r}_m = \sum_{n=1}^m r_{nm} / m \quad (3)$$

$$S_j = \sqrt{\sum_{n=1}^m (r_{nm} - \bar{r}_m)^2 / (m-1)} \quad (4)$$

则标准化以后的模糊矩阵变为

$$R' = \begin{bmatrix} & V_1 & V_2 & \cdots & V_m \\ U_1 & r'_{11} & r'_{12} & \cdots & r'_{1m} \\ U_2 & r'_{21} & r'_{22} & \cdots & r'_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ U_n & r'_{n1} & r'_{n2} & \cdots & r'_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(3) 评价指标权重计算

采用熵权法计算各指标的权重。首先求出各指标的信息熵 E_i , 再计算权重 W_i 。 E_i 和 W_i 的计算如式 (6)–式 (8)。

$$E_i = -\ln(m)^{-1} \sum_{j=1}^m (P_{ij} \ln P_{ij}) (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

$$P_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^m r_{ij} \quad (7)$$

$$W_i = \frac{1 - E_i}{n - \sum E_i} (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中, $r_{ij}(i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, \dots, 16)$ 为标准化的数据; P_{ij} 为第 i 项指标下第 j 个样本值占该指标的比重值, 其中当 $P_{ij}=0$ 时, $\ln P_{ij}=0^{[13]}$ 。

(4) 综合评分矩阵

为了得到最终评价结果, 需要制定一个参照值, 即标准的评价物元^[14]。试验初始数据显示, 各品质指标在不同处理下变化很大, 数据上升和下降交替出现, 所以 CK 值作为标准物元也会影响结果的准确性, 为了克服这个缺点, 把各组处理标准化的最大值作为标准物元(\hat{V})。因此, 评价矩阵 R' 就可写为 \tilde{R}' 。即

$$\tilde{R}' = \begin{bmatrix} \hat{V} & V_1 & V_2 & \dots & V_m \\ U_1 & r_{10}' & r_{11}' & r_{12}' & \dots & r_{1m}' \\ U_2 & r_{20}' & r_{21}' & r_{22}' & \dots & r_{2m}' \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_n & r_{n0}' & r_{n1}' & r_{n2}' & \dots & r_{nm}' \end{bmatrix} \quad (9)$$

该评价矩阵中 V_j 的评分越接近标准物元 \hat{V} , 则表明品质越好^[15]。计算方法如式 (10) 和式 (11)。

$$\delta(\hat{V}, V_j) = \sum_{i=1}^n (W_i r_{ij}) \quad (10)$$

$$R_\delta = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \dots & V_m \\ \delta & \delta_1 & \delta_2 & \dots & \delta_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

1.4.2 经验模型的建立

利用 2018 年数据建立模糊矩阵综合评分与胁迫温度 (T) 和胁迫天数 (D) 的经验模型, 即

$$R_\delta = f(T, D) \quad (12)$$

1.5 数据分析

1.5.1 数据处理方法

用 Excel2017 和 SPSS17.0 进行数据分析, 用 GraphPad Prism 7.05 绘图。

1.5.2 模拟验证

用均方根误差(RMSE, Root Mean Squared Error)和相对误差(RE, Relative Estimation Error)进行经验模型模拟值和模糊矩阵综合评分实测值之间对比, RMSE 值越小, 表明模拟精度越高, 模型越好^[15]。RMSE 和 RE 的计算式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$RE = \frac{n \cdot RMSE}{\sum_{i=1}^n OBS_i} \times 100\% \quad (14)$$

式中, OBS_i 和 SIM_i 为观测值和拟合值。n 为样本量的大小。

2 结果与分析

2.1 苗期高温对草莓果实营养品质的影响

2.1.1 维生素 C

由图 2 可见, CK (苗期不受高温影响) 处理成熟果实中 VC 含量最高, 均在 $93\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 左右, 而苗期经历不同程度高温的各处理, 其成熟果实中 VC 含量均有不同程度的降低, 降低程度与高温程度及其持续日数呈正相关。具体来看, 高温胁迫 2d, 各温度处理下果实中 VC 含量与 CK 无差异; 高温胁迫 5d, 32°C 和 35°C 处理后果实中 VC 含量与 CK 无差异, 而 38°C 和 41°C 处理后 VC 含量显著低于 CK, 分别比 CK 减少 16.66% 和 18.75%; 高温胁迫 8d, 各温度处理下果实中 VC 含量均显著低于 CK, 32°C 、 35°C 、 38°C 和 41°C 处理分别比 CK 减少 17.71%、19.79%、27.08% 和 32.29%, 其中 32°C 和 35°C 处理下 VC 含量与 CK 无显著差异, 但均显著高于 38°C 和 41°C 处理; 高温胁迫 11d, 各温度处理下果实中 VC 含量显著低于 CK, 分别比 CK 减少 29.16%、39.58%、42.71% 和 47.91%, 其中 35°C 、 38°C 和 41°C 处理后果实中 VC 含量与 CK 无显著差异, 但均显著低于 32°C 处理。

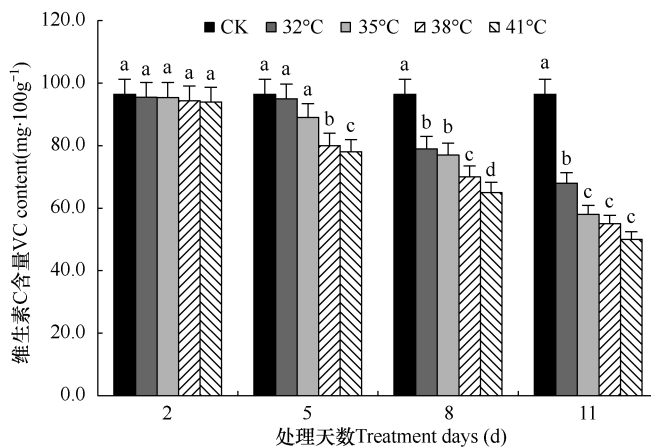


图 2 苗期不同高温和持续天数处理后成熟草莓果实中 VC 含量的比较

Fig. 2 Comparison of the VC content in ripe strawberry fruit among high temperature treatments after different days during seedling stage

注: 小写字母表示处理间在 0.05 水平上的差异显著性。下同。
Note: Lowercase indicates the difference significance among treatments at 0.05 level. The same as below.

2.1.2 花青苷

从图 3 可以看出, 高温胁迫 2d, 32℃ 和 35℃ 处理果实花青苷含量与 CK 无差异, 38℃ 处理显著高于 CK, 比 CK 提高 18.03%, 41℃ 处理显著小于 CK, 比 CK 减少 13.85%; 高温胁迫 5d, 32℃ 处理果实花青苷含量与 CK 无差异, 35℃ 和 38℃ 处理显著高于 CK, 分别比 CK 提高 13.85% 和 20.00%, 41℃ 处理后显著小于 CK, 比 CK 减少 16.92%; 高温胁迫 8d, 32℃ 和 35℃ 处理果实花青苷含量显著高于 CK, 分别提高 7.69% 和 16.92%, 38℃ 和 41℃ 处理显著低于 CK, 分别比 CK 降低 23.08% 和 29.23%; 高温胁迫 11d, 32℃ 和 35℃ 处理果实花青苷含量显著高于 CK, 分别提高 20.00% 和 23.08%, 38℃ 和 41℃ 处理显著低于 CK, 分别比 CK 降低 32.31% 和 38.46%。可见, 32℃ 和 35℃ 处理果实花青苷含量随着处理天数增加而增大, 38℃ 处理随着处理天数延长先增加后减小, 41℃ 处理则随着处理天数增加而减小。

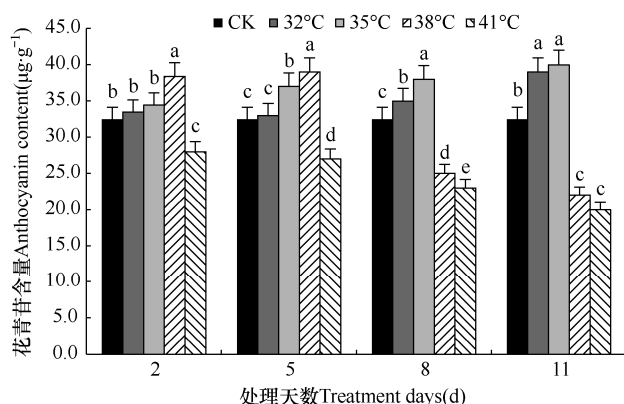


图 3 苗期不同高温和持续天数处理成熟草莓果实中花青苷含量的比较

Fig. 3 Comparison of the anthocyanin content in ripe strawberry fruit among high temperature treatments after different days during seedling stage

2.1.3 可溶性糖

从图 4 可以看出, 成熟果实中可溶性糖 (TSC) 在不同高温处理下的变化趋势与花青苷一致。高温胁迫 2d, 32℃ 和 35℃ 处理果实 TSC 含量与 CK 无差异, 38℃ 处理显著高于 CK, 比 CK 提高 9.55%, 41℃ 处理显著小于 CK, 比 CK 减少 4.74%; 高温胁迫 5d, 32℃ 处理果实 TSC 含量与 CK 无差异, 35℃ 和 38℃ 处理显著高于 CK, 分别比 CK 提高 7.62% 和 19.05%, 41℃ 处理显著小于 CK, 比 CK 减少 10.48%; 高温胁迫 8d, 32℃ 和 35℃ 处理果实 TSC 含量显著高于 CK,

分别比 CK 提高 6.67% 和 11.43%, 38℃ 和 41℃ 处理显著低于 CK, 分别比 CK 降低 6.66% 和 15.24%; 高温胁迫 11d, 32℃ 和 35℃ 处理果实 TSC 含量显著高于 CK, 分别比 CK 提高 9.53% 和 16.19%, 38℃ 和 41℃ 处理显著低于 CK, 分别比 CK 降低 14.29% 和 23.81%。可见, 32℃ 和 35℃ 处理果实 TSC 含量随着胁迫天数延长而增加, 38℃ 处理随着处理天数的延长先增加后减小, 41℃ 处理则随着处理天数延长而减小。

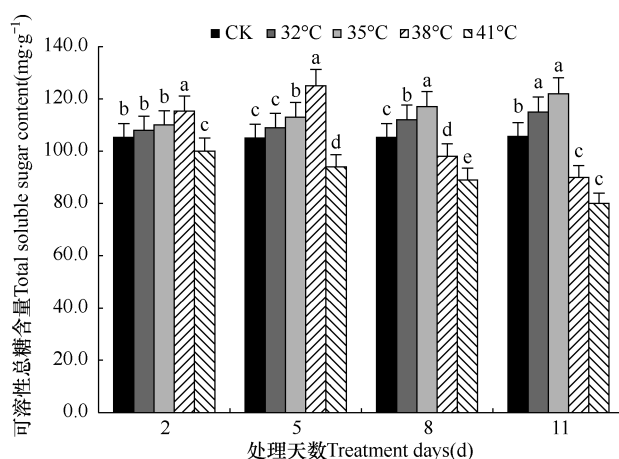


图 4 苗期不同高温和持续天数处理成熟草莓果实中可溶性糖含量的比较

Fig. 4 Comparison of the total soluble sugar content in ripe strawberry fruit among high temperature treatments after different days during seedling stage

2.1.4 可滴定酸

由图 5 可见, 高温胁迫 2d, 32℃ 和 35℃ 处理果实可滴定酸 (TA) 含量与 CK 无差异, 38℃ 处理显著低于 CK, 比 CK 降低 15.40%, 41℃ 处理显著高于 CK, 比 CK 提高 10.91%; 高温胁迫 5d, 32℃ 和 35℃ 处理果实 TA 含量与 CK 无差异, 38℃ 处理显著低于 CK, 比 CK 降低 21.07%, 41℃ 处理显著高于 CK, 比 CK 提高 19.46%; 高温胁迫 8d, 32℃、35℃ 和 38℃ 处理果实 TA 含量均显著低于 CK, 分别比 CK 提高 23.86%、30.46% 和 36.04%, 41℃ 处理果实 TA 含量显著高于 CK, 比 CK 提高 21.92%; 高温胁迫 11d, 32℃ 和 35℃ 处理果实 TA 含量显著低于 CK, 分别降低 30.63% 和 38.07%, 38℃ 和 41℃ 处理显著高于 CK, 分别提高 10.83% 和 22.83%。可见, 32℃ 和 35℃ 处理果实 TA 含量随着胁迫天数延长而减小, 38℃ 处理则随着胁迫天数延长先降低后增加, 而 41℃ 处理则随着胁迫天数延长而增加。

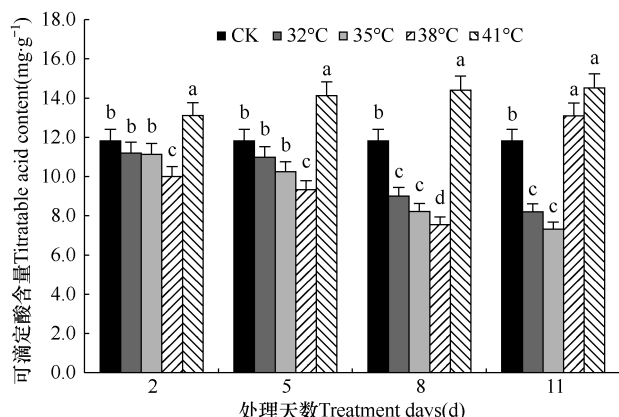


图 5 苗期不同高温和持续天数处理成熟草莓果实中可滴定酸含量的比较

Fig. 5 Comparison of the titratable acid content in ripe strawberry fruit among high temperature treatments after different days during seedling stage

2.2 苗期高温对草莓果实内在品质影响的综合评价

2.2.1 模型构建

(1) 根据式 (6) - 式 (8) 求得维生素 C、花青苷、可溶性糖和可滴定酸的权重为

$$W_i = (\text{维生素C, 花青苷, 可溶性糖, 可滴定酸}) \quad (15)$$

$$= (0.23, 0.25, 0.19, 0.33)$$

(2) 根据式 (1) - 式 (5) 和式 (9), 求得评价矩阵 R' 为

$$R' = \begin{bmatrix} \hat{V} & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & V_6 & V_7 \\ U_1 & 0.99 & 1 & 0.98 & 0.64 & 0.40 & 0.99 & 0.86 & 0.59 \\ U_2 & 0.95 & 0.67 & 0.5 & 0.75 & 0.95 & 0.72 & 0.85 & 0.90 \\ U_3 & 0.93 & 0.62 & 0.64 & 0.71 & 0.78 & 0.67 & 0.73 & 0.82 \\ U_4 & 0.97 & 0.46 & 0.49 & 0.77 & 0.88 & 0.47 & 0.59 & 0.88 \\ V_8 & V_9 & V_{10} & V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} & V_{15} & V_{16} \\ 0.18 & 0.98 & 0.66 & 0.44 & 0.11 & 0.97 & 0.62 & 0.33 & 0 \\ 1 & 0.92 & 0.95 & 0.25 & 0.10 & 0.40 & 0.35 & 0.15 & 0 \\ 0.93 & 0.79 & 1 & 0.40 & 0.22 & 0.44 & 0.31 & 0.20 & 0 \\ 1 & 0.63 & 0.72 & 0.97 & 0.20 & 0.20 & 0.06 & 0.02 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

(3) 根据式 (10) 和式 (11), 求得不同处理下模糊综合品质得分 R_δ 为

$$R_\delta = \begin{bmatrix} \hat{V} & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & V_6 & V_7 & V_8 \\ 0.97 & 0.67 & 0.68 & 0.72 & 0.76 & 0.69 & 0.74 & 0.81 & 0.80 \\ V_9 & V_{10} & V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} & V_{15} & V_{16} \\ 0.81 & 0.82 & 0.56 & 0.15 & 0.47 & 0.31 & 0.16 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

(4) 构建模糊综合评价分数 R_δ 与胁迫温度和胁迫天数的方程。模糊综合得分 R_δ 与胁迫温度 (T) 和胁迫天数 (D) 之间的二次多项式为

$$R_\delta = -12.21 + 0.76T + 0.01D - 0.01T^2 - 0.003D^2 \quad (18)$$

$$(P < 0.05, R^2 = 0.73)$$

式中, T 的取值在 32~41℃, D 的取值在 2~11d。

2.2.2 模型验证

使用 2019 年的数据, 根据式 (17) 计算不同温度和胁迫天数下的 R_δ 值, 并与模糊综合评价模型算出的 R_δ 值进行对比 (图 6)。由图 6 可以看出, 利用模型 (17) 拟合的 R_δ 值和模糊综合评价模型算出的 R_δ 值较好地呈现在 1:1 线附近, 基于 1:1 线的决定系数 R^2 为 0.86, 说明模型模拟精度较高。

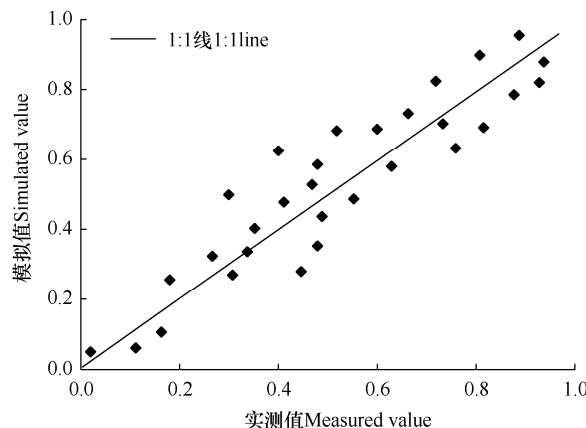


图 6 模糊综合得分的模拟值与实测值的比较

Fig. 6 Comparison of simulated and observed fuzzy evaluation values

图 7 为模型预测的线性残差图 (观测值-模拟值)。从图可以看出, 模型模拟值与实测值的误差在 0.25 以内, 模型对果实综合评价值模拟的均方根误差 (RMAE) 和相对误差 (RE) 分别为 0.01 和 0.06%, 说明模拟值与实测值的一致性较好。

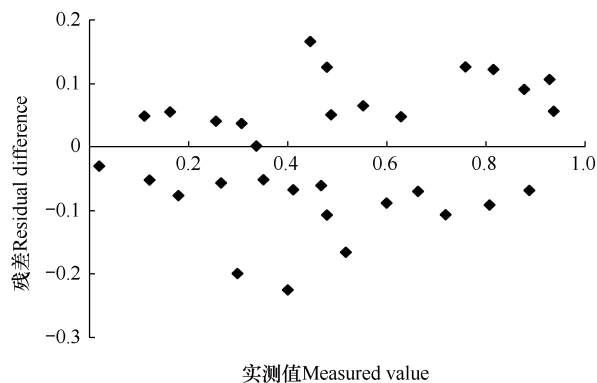


图 7 模糊综合评价值的观测值与模拟值的残差

Fig. 7 Residual difference between measured and simulated fuzzy evaluation values

2.2.3 评价结果

利用模糊数学综合法评价苗期高温对草莓果实内在品质的影响, 结果显示, 苗期高温下 4 种草莓

内在品质的权重大小分别是,可滴定酸(0.33) > 花青苷(0.25) > 维生素 C(0.23) > 可溶性糖(0.19)。说明苗期高温后,可滴定酸含量决定着草莓内在品质的好坏。模糊综合评价得分显示,苗期 V7-V10 处理(即 35℃ 高温下处理 8d 和 11d,以及 38℃ 高温下处理 2d 和 5d)下综合果实品质得分最高,均大于 0.8, V1-V6 处理(即 32℃ 高温下处理 2、5、8 和 11d,以及 35℃ 高温下处理 2d 和 5d)下综合果实品质得分居中(0.6~0.8), V11-V16(即 38℃ 高温下处理 8d 和 11d,以及 41℃ 高温下处理 2、5、8 和 11d)处理综合果实品质得分最低(0~0.6)。说明草莓苗期轻度或中度的高温处理会提高果实的内在品质,而重度高温胁迫则降低果实的内在品质。

3 结论与讨论

3.1 讨论

果实是作物光合有机物的库,作物通过光合作用合成有机物,然后转移到果实中供其生长发育,因此,当植物体受到高温胁迫时,植株的光合作用会随着改变,进而影响果实生长发育和品质^[16-17]。本研究通过分析苗期高温对草莓果实最重要的 4 种内在品质的影响,发现不同高温处理和不同胁迫时间对草莓内在品质的影响不尽相同。32℃ 和 35℃ 处理后果实中可溶性糖(TSC)含量随着胁迫天数增加而增加,38℃ 和 41℃ 处理后果实中 TSC 含量则随着胁迫天数增加先增加后降低。这可能是由于高温胁迫后,光合源(叶片光合作用)的供给反应不同,轻度高温处理通过补偿作用可以完全补给光合源亏缺的负面效应,而重度高温胁迫则使得叶片光合器官受损,源的供给较差,进而导致果实内糖的积累受阻^[18-19]。花青苷的变化趋势与 TSC 含量变化基本一致,这是因为花青苷是一种极性化合物,具有很强的生物活性,它的稳定性取决于糖基化程度,糖基化程度越高,其稳定越大^[20-21]。TSC 含量与 TA 的含量比例是果实品质的一个重要指标,二者的动态平衡控制果实口感^[22]。这在本研究中也有所体现,TA 的变化趋势与 TSC 基本相反。

目前评判果实品质主要通过主成分分析法和聚类分析综合评价,林蝉蝉等^[9]通过基于主成分与聚类分析综合评价葡萄果实品质, Mir 等^[23]通过基于主成分与聚类分析综合评价苹果果实品质。虽然主成分提取指标应用广泛,但也不可否认其在计算过程中简化了指标,不能包含全部的信息^[24]。而模糊数学

评价方法则避免了这个问题,并且还避开了主观性,使结果更加客观从而取个更好的评价效果^[25]。模糊数学法在评价葡萄品质^[25],小白菜内在品质^[26],南瓜品质^[27]和黄瓜品质^[14]方面有优势,但是草莓果实品质不仅包括内在品质,还有外在品质(大小、颜色)等,后期应综合考虑开展系统性研究。本研究依据不同温度和胁迫天数与果实综合内在品质模型关系,建立了模糊综合果实内在品质评价模型,很好地预测了苗期高温后草莓果实综合内在品质,可为设施草莓温室温度调控提供理论支持。但是模型还需要不同品种、不同环境和多重指标的验证才有普遍适用性。

3.2 结论

(1) 草莓苗期(9~12 片真叶,叶长 ≥ 5cm)花芽分化完成后,遇到一定程度的高温天气(日最高温度 35℃ 持续 11d 以内或日最高温度 38℃ 持续 5d 以内)可适当提高草莓果实内在综合品质。

(2) 在高温(T) 32~41℃,胁迫时间(D) 2~11d 区间,构建了综合内在品质得分与高温和胁迫天数的模型,即 $R_g = -12.21 + 0.76T + 0.01D - 0.01T^2 - 0.003D^2$ ($P < 0.05, R^2 = 0.73$)。模型对综合果实内在品质的预测值与实测值回归估计标准误(RMSE)和相对误差(RE)分别为 0.01 和 0.06%,精度较高,具有较强的实用性。

参考文献 References

- [1] 舒锐,焦健,臧传江,等.我国草莓产业现状及发展建议[J].中国果菜,2019,39(1):51-53.
Shu Y, Jiao J, Zang C, et al. The current situation and development suggestions of strawberry industry in China[J]. China Fruit and Vegetable, 2019, 39(1): 51-53. (in Chinese)
- [2] Wu B, Feng J, Zhang M, et al. First report of hop stunt viroid infecting strawberry in China[J]. Plant Disease, 2019, 103(1): 168-168.
- [3] Wang S Y, Camp M J. Temperatures after bloom affect plant growth and fruit quality of strawberry[J]. Scientia Horticulturae, 2000, 85(3): 183-199.
- [4] 高亮之,金之庆,黄耀,等.农业模型学[M].北京:气象出版社,2019.
Gao L Z, Jin Z Q, Huang Y, et al. Agricultural modeling science [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2019. (in Chinese)
- [5] Zahedi S M, Hosseini M S, Abadía J, et al. Melatonin foliar

- sprays elicit salinity stress tolerance and enhance fruit yield and quality in strawberry(*Fragaria×ananassa* Duch.)[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2020,149:313-323.
- [6] 杨洋,张小虎,张亚红,等.设施调控夜间温度对赤霞珠葡萄果实品质的影响[J].食品科学,2020,32(1):1-10.
- Yang Y,Zhang X H,Zhang Y H,et al.Effects of regulated night temperature in greenhouse on grape quality of cabernet sauvignon[J].Food Science,2020,32(1):1-10.(in Chinese)
- [7] 薛思嘉,杨再强,李军.黄瓜花期高温热害对叶片光合特性和果实品质的影响[J].北方园艺,2017(6):1-7.
- Xue S J,Yang Z Q, Li J.Effect of high temperature stress on photosynthetic characteristics and fruit quality of greenhouse cucumber leaves in flowering stage[J].Northern Horticulture,2017(6):1-7.(in Chinese)
- [8] 杨再强,王学林,彭晓丹,等.人工环境昼夜温差对番茄营养物质和干物质分配的影响[J].农业工程学报,2014, 30(5): 138-147.
- Yang Z Q,Wang X L,Peng X D,et al.Effect of difference between day and night temperature on nutrients and dry mass partitioning of tomato in climate chamber[J].Transactions of the CSAE,2014,30(5):138-147.(in Chinese)
- [9] 林蝉蝉,何舟阳,单文龙,等.基于主成分与聚类分析综合评价杨凌地区红色鲜食葡萄果实品质[J].果树学报,2020, 37(4):520-532.
- Lin C C,He Z D,Shan W L,et al.Comprehensive evaluation of fruit quality of 12 red table grape cultivars cultivated in Yangling area based on principal component and cluster analyses[J].Journal of Fruit Science,2020,37(4):520-532.(in Chinese)
- [10] 韦婷婷,杨再强,王明田,等.高温与空气湿度交互对花期番茄植株水分生理的影响[J].中国农业气象,2019,40(5): 317-326.
- Wei T T,Yang Z Q,Wang M T,et al.Effects of high temperature and different air humidity on water physiology of flowering tomato seedling[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2019,40(5):317-326.(in Chinese)
- [11] 韦婷婷,杨再强,王琳,等.玻璃温室和塑料大棚内逐时气温模拟模型[J].中国农业气象,2018,39(10):644-655.
- Wei T T,Yang Z Q,Wang L,et al.Simulation model of hourly air temperature inside glass greenhouse and plastic greenhouse[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2018, 39(10):644-655.(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 guidance for plant physiology[M].Beijing:Higher Education Press,2009.(in Chinese)
- [13] Zou Z H,Sun J N.Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2005, 44(2): 171-202.
- [14] 陈爱强.果蔬采后冷激处理的理论与试验研究[D].天津:天津大学,2016.
- Chen A Q.Theoretical and experimental study on cold shock treatments of postharvest fruits and vegetables [D]. Tianjin: Tianjin University,2016.(in Chinese)
- [15] Xu C,Yang Z Q,Wang M T,et al.Characteristics and quantitative simulation of stomatal conductance of *Panax notoginseng*[J].International Journal of Agriculture and Biology,2019,22(2):388-394.
- [16] 刘万代.源库调节方式对两种穗型高产小麦碳氮代谢生理和籽粒品质的影响[D].郑州:河南农业大学,2014.
- Liu W D.Effects of source-sink adjusting modes on carbon-nitrogen physiological metabolism and grain quality in high-yield wheat with two spike-type cultivars[D]. Zhengzhou:Henan Agricultural University,2014.(in Chinese)
- [17] Lee S H,Song M K,Choi W H,et al.Effect of the shading conditions on the photosynthesis and fruit quality of ‘Jarang’ and ‘Heukboseok’ grape at high temperature period[J].Journal of the Korean Society of International Agriculture,2015,27(2):221-225.
- [18] 许蓓蓓,尤翠翠,丁艳锋,等.源库调节对常规粳稻花后营养器官碳水化合物及氮磷钾转运的影响[J].中国农业科学,2016,49(4):643-656.
- Xu B B,You C C,Ding Y F,et al.Effect of source-sink manipulation on translocation of carbohydrate and nitrogen, phosphors,potassium in vegetative organs of conventional japonica rice after anthesis[J]. Scientia Agricultura Sinica,2016, 49(4): 643-656.(in Chinese)
- [19] 李健陵,张晓艳,杜尧东,等.高温对抽穗开花期至灌浆结实期水稻源库特性的影响[J].中国农业气象,2013, 34(1): 23-29.
- Li J L,Zhang X Y,Du Y D,et al.Effects of high temperature

- on rice source-sink characteristics during heading stage to grain filling stage[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2013,34(1):23-29.(in Chinese)
- [20] 阎依超,万春雁,古咸彬,等.过量表达 *Rdreb1b1* 对草莓果实品质及相关基因的影响[J].中国农业科学,2018,51(7): 1353-1367.
- Yan Y C,Wan C Y,Gu X B,et al.Effect of *Rdreb1b1* gene overexpression on fruit quality and related gene expression in strawberry[J]. Scientia Agricultura Sinica,2018,51(7): 1353-1367.(in Chinese)
- [21] 刘晓芬,李方,殷学仁,等.花青苷生物合成转录调控研究进展[J].园艺学报,2013,40(11):2295-2306.
- Liu X F,Li F,Yin X R,et al.Recent advances in the transcriptional regulation of anthocyanin biosynthesis[J]. Acta Horticulturae Sinica,2013,40(11):2295-2306.(in Chinese)
- [22] 郑丽静,聂继云,闫震.糖酸组分及其对水果风味的影响研究进展[J].果树学报,2015,32(2):304-312.
- Zheng L J,Nie J Y,Yan Z.Advances in research on sugars, organic acids and their effects on taste of fruits[J]. Journal of Fruit Science,2015,32(2):304-312.(in Chinese)
- [23] Mir J I,Ahmed N,Singh D B,et al.Diversity evaluation of fruit quality of apple (*Malus domestica* Borkh.) germplasm through cluster and principal component analysis[J].Indian Journal of Plant Physiology,2017,22(2):221-226.
- [24] Wold S.Principal component analysis[J].Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,1987,2(1):37-52.
- [25] 刘美迎,李小龙,梁茁,等.基于模糊数学和聚类分析的鲜食葡萄品种综合品质评价[J].食品科学,2015,36(13):57-64.
- Liu M Y,Li X L,Liang Z,et al.Comprehensive quality assessment of table grapes varieties using fuzzy mathematics and cluster analysis[J].Food Science, 2015, 36(13): 57- 64.(in Chinese)
- [26] Han W,Yang Z Q,Huang L D,et al.Fuzzy comprehensive evaluation of the effects of relative air humidity on the morpho-physiological traits of Pakchoi(*Brassica chinensis* L.)under high temperature[J].Scientia Horticulturae,2019, 246:971-978.
- [27] 尹玲.南瓜感官品质分析和淀粉性质研究[D].北京:中国农业科学院,2012.
- Yi L.Sensory assess and starch properties analysis of pumpkin[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2009.(in Chinese)