

柳苗苗,蔡伟建,张斌斌,等. 槲皮素对草莓生长发育、光合和生理生化特性影响的综合评价[J]. 江苏农业科学,2022,50(21):165–172.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2022.21.025

槲皮素对草莓生长发育、光合和生理生化特性影响的综合评价

柳苗苗¹, 蔡伟建², 张斌斌², 赵密珍², 王 静², 刘怀锋¹

(1. 石河子大学农学院, 新疆石河子 832000; 2. 江苏省农业科学院果树研究所/江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室, 江苏南京 210014)

摘要:草莓是多年生草本植物,营养价值高,为探究不同浓度槲皮素对草莓农艺性状、叶片光合作用和生理生化特性的影响,筛选出草莓生产中最适合的槲皮素浓度,为未来草莓的生产提供指导。以宁玉草莓品种为试验材料,通过施用不同浓度(20、40、80 mg/L)外源槲皮素,测定株高、叶柄长、叶片数等 24 个指标,评价其对草莓植株农艺性状、叶片光合参数、生理生化影响;对 24 个指标进行主成分分析,并进行综合评价指标的确定。将综合评价指标的原始数值转化为隶属函数值,筛选出有利于冬春季草莓生产的最适槲皮素浓度。结果表明,外源施用槲皮素提高了草莓植株的结果数、单果质量、叶柄长、叶面积、根茎粗、叶绿素含量、净光合速率、胞间 CO₂ 浓度、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和脯氨酸含量,降低了丙二醛含量。主成分分析将 24 个单项指标归类为 3 个综合指标,隶属函数法分析结果表明,40 mg/L 槲皮素处理对冬春季草莓生产有利。

关键词:冬春季草莓;槲皮素;农艺性状;光合气体参数;生理生化特性

中图分类号:S668.401 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2022)21–0165–08

草莓生长周期短、产出快、收益高,是江苏等地冬春季第 1 果。草莓以设施生产为主,冬春季低温

弱光会严重制约草莓生产,提高设施条件下草莓的光合速率和抗性,是冬春季草莓生产的重要研究方向。

槲皮素(quercetin)即 3,3',4',5,7-五羟基黄酮,是一种植物性黄酮醇,属于多酚中的黄酮类化合物,广泛存在于果蔬、中草药植物的花、叶和果实中^[1],位于叶绿体外被,有强抗氧化作用^[2–3],有望成为一种新的植物生物刺激素^[2–4]。槲皮素在植物中的应用较少,主要集中在保护植物免受非生物胁迫的影响^[5–7],或通过激素信号[脱落酸(ABA)、吡啶-3-乙酸(IAA)]级联调控影响植物生长

收稿日期:2021–12–03

基金项目:国家重点研发计划(编号:2018YFD1000300);国家自然科学基金(编号:32072533);江苏省农业科技自主创新资金[编号: CX(19)3041]。

作者简介:柳苗苗(1996—),女,新疆石河子人,硕士,主要研究方向为园艺学果树。E-mail:mia.6@qq.com。

通信作者:王 静,博士,研究员,主要从事草莓种质资源与育种研究,E-mail:wangjing8375@jaas.ac.cn;刘怀锋,博士,教授,主要从事果树栽培生理研究,E-mail:lhf_agr@shzu.edu.cn。

[15]王乐政,华方静,曹鹏鹏,等. 不同密度下夏播红小豆抗倒伏能力变化规律的研究[J]. 山东农业科学,2020,52(9):39–44.

[16]赛 丹,何伟锋. 插穗处理及扦插密度对菊花育苗成活率的影响[J]. 园艺与种苗,2019,39(10):5–6,28.

[17]徐 扬,刘 引,郭兰萍,等. 种植密度对菊花产量和品质的影响[J]. 中国中药杂志,2020,45(1):59–64.

[18]张冬梅. 温度对切花菊插穗生根和定植密度对切花菊品质影响的研究[D]. 南京:南京农业大学,2017:27–44.

[19]董晓晓,刘 雪,蒋亚蓉,等. 干旱胁迫对 24 种宿根花卉生长的影响[J]. 西北林学院学报,2019,34(3):125–131.

[20]杨信程,苏江硕,吴洋洋,等. 切花小菊主要分枝性状的混合遗传分析[J]. 南京农业大学学报,2018,41(3):440–446.

[21]马婉娟,房伟民,王海滨,等. 多头切花菊品种茎、枝特性评价体系构建与品种评价[J]. 中国农业科学,2019,52(14):2515–

2524.

[22]韩 勇,叶燕萍,陈发棣,等. 多头切花菊品质性状综合评价体系构建[J]. 中国农业科学,2011,44(20):4265–4271.

[23]Peng H,Zhang F,Jiang J F,et al. Identification of quantitative trait loci for branching traits of spray cut *Chrysanthemum* [J]. Euphytica,2015,202(3):385–392.

[24]Sun W,Yang X C,Su J S,et al. The genetics of planting density-dependent branching in *Chrysanthemum*[J]. Scientia Horticulturae, 2019,256:1085–1098.

[25]Chung S O,Kim Y J,Lee K H,et al. Growth characteristics of *Chrysanthemum* according to planting density[J]. Korean Journal of Agricultural Science,2017,44(4). 604–612.

[26]李向茂,戴剑锋,罗卫红,等. 定植期和定植密度对温室单头切花菊外观品质的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(5):1057–1062.

发育^[8-9]。

本试验以宁玉草莓品种为材料,研究不同浓度(0、20、40、80 mg/L)槲皮素溶液对草莓生长发育、光合及抗性的影响,以期确定槲皮素对于草莓耐低温弱光的作用,为未来草莓的生产提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验设计与试剂

供试材料为宁玉草莓(由江苏省农业科学院选育并经江苏省农作物品种审定委员会鉴定),将草莓种苗定植于江苏省农业科学院溧水植物科学基地中长度 55 m、跨度 7 m 的塑料大棚内,垄高 30 cm,垄面宽 60 cm,垄间距 40 cm,采用高垄双行的栽培方式。处理分为 6 个小区,种苗植株长势均一,分别喷施 20、40、80 mg/L 槲皮素(分别记作 T₁、T₂、T₃ 处理),以喷清水为对照(CK),每个小区设 5 株重复,取草莓顶端生长点以下完全展开的第 2~3 张叶片测定相关指标。

槲皮素、丙二醛(MDA)试剂盒、脯氨酸测定试剂盒、总抗氧化能力试剂盒(T-AOC)均购于南京建成生物工程研究所,测定可溶性糖含量所用试剂盒购于索莱宝生物科技有限公司,蛋白含量测定所用考马斯亮蓝法蛋白含量测试盒、测定植物总酚(TP)含量所用测试盒购于苏州科铭生物技术有限公司。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 植株农艺性状测定 2021 年 2 月测定草莓的农艺性状和光合特性。株高、叶柄长、果长和果宽用卡尺测定,根茎粗用游标卡尺测定,花序数、叶片数用目测法测定,果质量用电子计数天平称量,叶面积使用 CI-203 手持式激光叶面积仪(美国 CID 公司)测定,相对叶绿素含量使用 SPAD-502 Plus 便携式叶绿素测定仪(日本柯尼卡美能达公司)测定。选择连续无云的晴天,在 09:00—11:00 用 Li-6800 便捷式光合系统测定仪(美国 LI-COR 公司)测定光合参数[光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO₂ 浓度(C_i)]。

1.2.2 叶片生理生化指标测定 丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)、可溶性糖、可溶性蛋白、总酚(TP)含量和总抗氧化能力(T-AOC)均用试剂盒检测。

1.3 数据处理

用 Excel 2016 进行试验数据整理,用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析(ANOVA)、邓肯差异显著性

($\alpha=0.05$)分析和双变量相关性分析,用 DPS 7.05 统计处理软件进行主成分分析。

通过如下公式得出不同处理后综合指标的隶属函数:

$$U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), j = 1, 2, 3, \dots, n。$$

式中: X_j 表示第 j 个综合指标; X_{\max} 、 X_{\min} 分别表示第 j 个综合指标的最大值、最小值。根据公式计算出每个处理所有指标的隶属函数值。

权重计算公式:

$$W_j = P_j / n \sum_{j=1}^n P_j, j = 1, 2, 3, \dots, n。$$

式中: W_j 表示在所有综合指标中第 j 个综合指标的重要程度(权重); P_j 表示第 j 个综合指标的贡献率。

综合评价指标(D 值)的计算公式:

$$D = n \sum_{j=1}^n [u(X_j) \times W_j], j = 1, 2, 3, \dots, n。$$

式中: D 值即草莓在不同浓度槲皮素处理下用综合指标评价得到的最优处理浓度的综合评价价值。

用 Origin 2019 软件分析作图,数据均用“平均值 \pm 标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 对草莓花序数、结果数和果实质量的影响

由图 1 可以看出,不同浓度槲皮素对草莓花序数量和结果数量的影响不大,喷施清水的对照与 20、40、80 mg/L 3 个浓度槲皮素处理的花序数量间差异不显著,但结果数量有显著差异。清水对照与 20、40、80 mg/L 槲皮素处理的花序数分别为 2.86、3.36、2.73、3.07 个,结果数分别为 3.52、6.24、5.74、6.47 个。由表 1 可以看出,与清水对照相比,3 种浓度槲皮素处理的单果质量和果实总质量均增加,清水对照与 20、40、80 mg/L 槲皮素处理的果实总质量、单果质量分别为 301.14、338.18、366.60、382.08 g 和 19.30、22.91、25.13、25.21 g,3 种浓度槲皮素处理间的果实可溶性固形物含量差异不显著。

2.2 对草莓植株农艺性状的影响

由表 2 可以看出,在不同浓度槲皮素处理下,草莓农艺性状中的株高、叶片数与清水对照处理相比均无显著差异,清水对照与 3 个浓度槲皮素处理的株高分别为 12.85、12.73、12.95、12.75 cm,相互之间无显著差异;各处理的植株叶片数为 11.85~15.67 张,没有显著差异。与清水对照相比,槲皮素处理的植株叶柄更长、叶面积更大、根茎越粗且差异显著,20 mg/L 槲皮素处理的叶面积最大,为

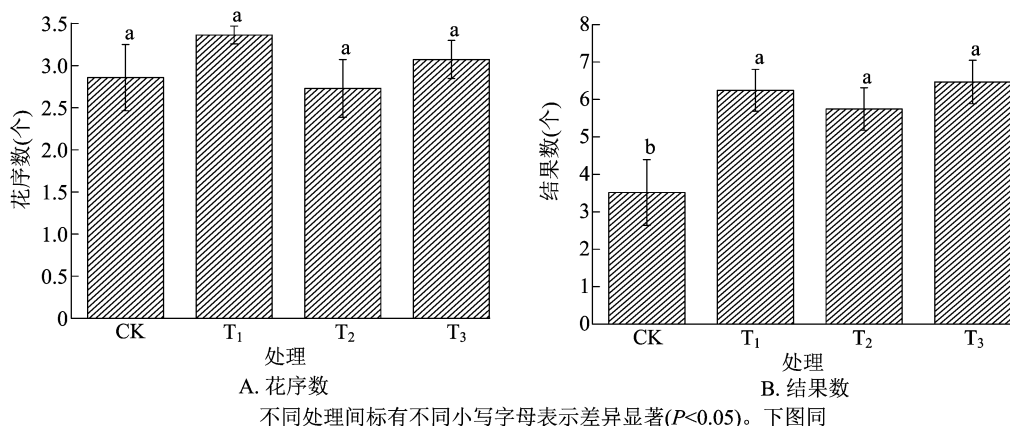


图1 不同浓度褪皮素对草莓花、果数量的影响

表1 不同浓度褪皮素对草莓果实质量的影响

处理	总质量 (g)	单果质量 (g)	果实纵径 (cm)	果实横径 (cm)	硬度 (kg/cm ²)	可溶性固形物含量 (%)
CK	301.14 ± 23.28a	19.30 ± 1.414b	4.14 ± 0.098b	3.46 ± 0.094a	0.33 ± 0.010b	11.15 ± 0.24a
T ₁	338.18 ± 13.90a	22.91 ± 1.366ab	4.24 ± 0.097ab	3.50 ± 0.077a	0.39 ± 0.015a	11.25 ± 0.24a
T ₂	366.60 ± 37.90a	25.13 ± 1.804a	4.42 ± 0.121ab	3.61 ± 0.082a	0.38 ± 0.015a	11.59 ± 0.28a
T ₃	382.08 ± 66.75a	25.21 ± 1.392a	4.55 ± 0.118a	3.58 ± 0.089a	0.42 ± 0.013a	11.28 ± 0.18a

注:同列数据后标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),表2同。

表2 不同浓度褪皮素对草莓植株农艺性状的影响

处理	株高 (cm)	叶柄长 (cm)	叶片数 (张)	叶面积 (cm ²)	根茎粗 (mm)
CK	12.85 ± 0.22a	8.99 ± 0.42b	11.85 ± 0.61a	15.23 ± 0.48b	12.32 ± 0.66b
T ₁	12.73 ± 0.17a	11.10 ± 0.37a	15.48 ± 1.60a	18.75 ± 0.36a	15.57 ± 0.59a
T ₂	12.95 ± 0.19a	11.33 ± 0.23a	15.58 ± 1.11a	18.19 ± 0.26a	15.70 ± 0.99a
T ₃	12.75 ± 0.35a	11.08 ± 0.41a	15.67 ± 1.11a	18.17 ± 0.35a	15.25 ± 0.62a

18.75 cm²,其次为40 mg/L 褪皮素处理(18.19 cm²)和80 mg/L 褪皮素处理(18.17 cm²),叶面积最小的为清水对照(15.23 cm²);40 mg/L 褪皮素处理的叶柄最长,根茎最粗,在叶柄长度上,表现为40 mg/L 褪皮素处理(11.33 cm) > 20 mg/L 褪皮素处理(11.10 cm) > 80 mg/L 褪皮素处理(11.08 cm) > 清水对照(8.99 cm);在根茎粗上,表现为40 mg/L 褪皮素处理(15.70 mm) > 20 mg/L 褪皮素处理(15.57 mm) > 80 mg/L 褪皮素处理(15.25 mm) > 清水对照(12.32 mm)。

2.3 对草莓叶片叶绿素含量和光合作用的影响

由图2可以看出,褪皮素处理显著提高了草莓植株叶片的叶绿素含量,20、40、80 mg/L 褪皮素处理的叶片叶绿素含量分别比对照高7.00%、6.86%、8.13%,在不同浓度褪皮素处理下,叶绿素含量无显著差异。

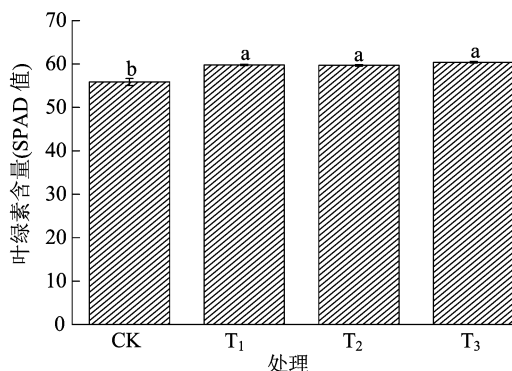


图2 不同浓度褪皮素对草莓叶片叶绿素含量的影响

由图3可以看出,褪皮素处理提高了草莓叶片的净光合速率、蒸腾速率、胞间CO₂浓度、气孔导度。在40 mg/L 褪皮素处理下, P_n 最大,为22.77 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,显著高于对照的20.73 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;在20、80 mg/L 褪皮素处理下, P_n 分别为21.52、22.33 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,

20 mg/L 处理、对照和 40 mg/L 槲皮素处理间有显著差异。在 80 mg/L 槲皮素处理下, T_r 最大, 达 $4.4 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 显著高于对照 [$3.3 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。在 20、40 mg/L 槲皮素处理下, T_r 分别为 3.9 、 $4.2 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 20 mg/L 处理、对照和 80 mg/L 槲皮素处理间差异显著。

80 mg/L 槲皮素处理的 C_i 、 G_s 分别为 $283.17 \text{ } \mu\text{mol}/\text{mol}$ 、 $0.3484 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 40 mg/L 槲皮素处理的 C_i 、 G_s 分别为 $275.88 \text{ } \mu\text{mol}/\text{mol}$ 、 $0.34 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 对照 C_i 、 C_s 分别为 $265.33 \text{ } \mu\text{mol}/\text{mol}$ 、 $0.28 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

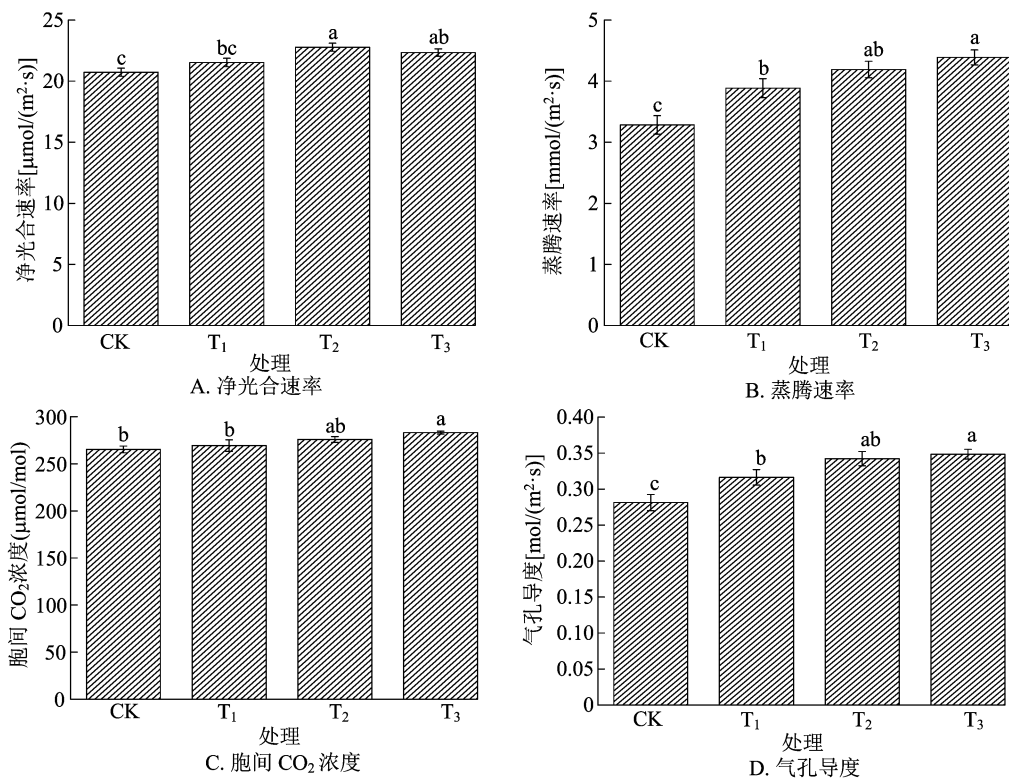


图3 不同浓度槲皮素对草莓叶片光合作用的影响

2.4 对草莓叶片丙二醛含量和脯氨酸含量的影响

由图 4 - A 可以看出,不同浓度槲皮素处理降低了草莓叶片中的丙二醛含量,并且随着施用槲皮素浓度的递增,丙二醛含量逐渐降低,其中清水处理的丙二醛含量最高,达 $0.0267 \text{ } \mu\text{mol}/\text{g}$, 80 mg/L 槲皮素处理的丙二醛含量仅为 $0.0183 \text{ } \mu\text{mol}/\text{g}$,表明施用

槲皮素可有效缓解逆境中植株细胞的受损。由图 4 - B 可以看出,施用槲皮素处理可有效提高植株叶片细胞中的脯氨酸含量,其中 40、80 mg/L 槲皮素处理下草莓植株叶片的脯氨酸含量分别为 38.5 、 $37.1 \text{ } \mu\text{g}/\text{g}$,与清水对照 ($20.5 \text{ } \mu\text{g}/\text{g}$) 间差异显著。

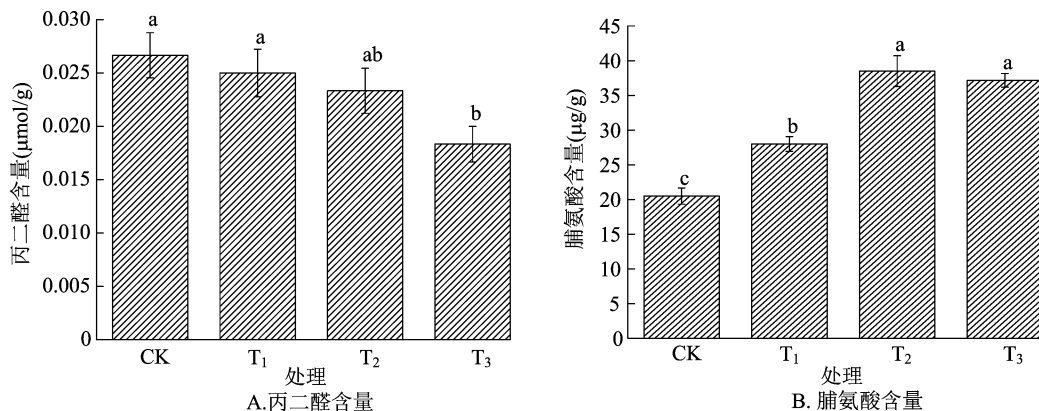


图4 不同浓度槲皮素对草莓叶片丙二醛、脯氨酸含量的影响

2.5 对草莓叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

由图 5 可以看出, 槲皮素处理的草莓植株叶片中的可溶性糖、可溶性蛋白含量与清水对照相比差异显著, 施用槲皮素有效提高了草莓植株叶片中可

溶性糖、可溶性蛋白含量。在 3 个不同浓度槲皮素处理下, 可溶性糖含量逐渐增加, 分别为 16.83、21.16、22.33 mg/g (图 5-A); 但 3 个浓度槲皮素处理之间的草莓叶片可溶性蛋白含量差异不显著 (图 5-B)。

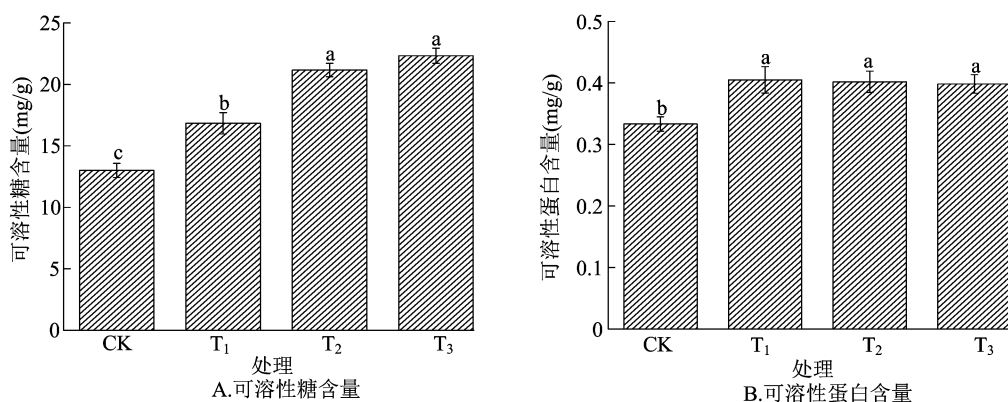


图5 不同浓度槲皮素对草莓可溶性糖和可溶性蛋白的影响

2.6 对草莓叶片总酚和总抗氧化能力的影响

施用不同浓度槲皮素对草莓叶片总酚含量 (图 6-A) 和总抗氧化能力 (图 6-B) 没有显著影响。

清水对照 (CK) 与 T₁、T₂、T₃ 处理的总酚含量分别为 16.18、16.74、16.78、16.76 mg/g, 总抗氧化能力分别为 8.392、8.785、9.558、8.864 U/mg。

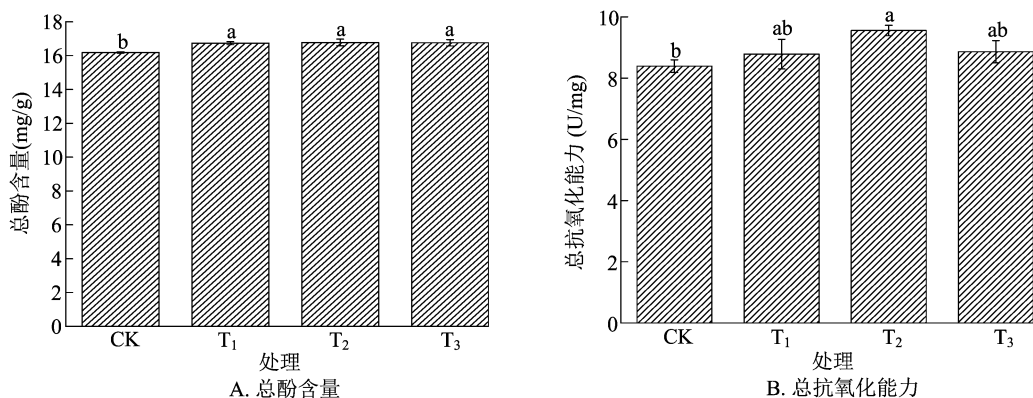


图6 不同浓度槲皮素对草莓叶片总酚和总抗氧化能力的影响

2.7 各项指标相关性主成分分析及隶属函数法综合评价

由表 3 可以看出, 总酚含量与叶柄长、叶片数, 可溶性糖含量与果实总质量, 根茎粗与叶柄长、可溶性蛋白含量间的相关系数最大, 均为 1.00。叶片数与叶柄长、叶面积、叶绿素含量、根茎粗、总酚含量及可溶性蛋白含量间呈极显著正相关, 相关系数均为 0.96 以上。呈极显著正相关的还包括结果数与叶片数、叶面积、可溶性蛋白含量、总酚含量, 以及根茎粗与叶面积、叶片数、叶绿素含量、总酚含量; 单果质量与叶柄长、叶片数、结果数、果实纵径、果实横径、果实硬度呈显著正相关, 相关系数分别

为 0.93、0.94、0.88、0.92、0.94、0.88, 同时单果质量与果实总质量、可溶性糖含量、蒸腾速率、净光合作用、气孔导度均呈极显著正相关。

在对不同浓度槲皮素处理结果的比较评价中, 直接用以上各项指标不具有代表性, 结果也缺乏准确性, 可利用主成分分析法进行分析, 进而确定综合评价指标。对不同浓度槲皮素处理的草莓的 24 项指标进行主成分分析, 提取出 3 个主成分, 累计贡献率达 100%, 可代表原来的 24 个指标, 其中第 1 主成分 (Z_1) 占 77.22%, 第 2 主成分 (Z_2) 占 15.19%, 第 3 主成分 (Z_3) 占 7.58%, 它们对应的特征向量表达式为:

表 3 不同浓度槲皮素对草莓各项指标的相关系数矩阵

指标	相关系数											
	株高	叶柄长	叶片数	花序数	结果数	叶面积	叶绿素含量	根茎粗	总质量	单果质量	果实纵径	果实横径
株高	1.00											
叶柄长	-0.13	1.00										
叶片数	-0.22	0.99 **	1.00									
花序数	-0.93 *	0.27	0.34	1.00								
结果数	-0.42	0.95 *	0.98 **	0.49	1.00							
叶面积	-0.31	0.97 **	0.98 **	0.48	0.97 **	1.00						
叶绿素含量	-0.30	0.97 **	0.99 **	0.37	0.99 **	0.96 **	1.00					
根茎粗	-0.15	1.00 **	0.99 **	0.32	0.94 *	0.98 **	0.96 **	1.00				
总质量	-0.06	0.86	0.88 *	0.02	0.85	0.77	0.90 *	0.82	1.00			
单果质量	0	0.93 *	0.94 *	0.03	0.88 *	0.84	0.94 *	0.90 *	0.98 **	1.00		
果实纵径	-0.03	0.73	0.76	-0.08	0.74	0.61	0.80	0.67	0.98 **	0.92 *	1.00	
果实横径	0.32	0.79	0.77	-0.31	0.67	0.64	0.76	0.75	0.93 *	0.94 *	0.90 *	1.00
硬度	-0.47	0.88 *	0.93 *	0.46	0.97 **	0.89 *	0.97 **	0.86	0.90 *	0.88 *	0.83	0.68
可溶性固形物含量	0.65	0.67	0.60	-0.48	0.41	0.51	0.52	0.65	0.60	0.71	0.52	0.84
丙二醛含量	0.27	-0.59	-0.65	-0.08	-0.70	-0.52	-0.73	-0.54	-0.89 *	-0.79	-0.95 *	-0.73
脯氨酸含量	0.18	0.86	0.85	-0.17	0.77	0.73	0.85	0.82	0.97 **	0.98 **	0.93 *	0.99 **
可溶性糖含量	0.03	0.84	0.85	-0.07	0.81	0.73	0.87	0.80	1.00 **	0.98 **	0.98 **	0.96 *
可溶性蛋白含量	-0.23	0.99 **	0.99 **	0.39	0.97 **	0.99 **	0.97 **	1.00 **	0.82	0.89 *	0.67	0.71
总酚含量	-0.17	1.00 **	1.00 **	0.30	0.96 **	0.98 **	0.99 **	0.99 **	0.88	0.94 *	0.75	0.79
总抗氧化能力	0.54	0.77	0.70	-0.37	0.53	0.62	0.63	0.75	0.69	0.80	0.60	0.88 *
蒸腾速率	-0.11	0.90 *	0.92 *	0.10	0.90 *	0.82	0.94 *	0.87	1.00 **	0.99 **	0.95 *	0.91 *
净光合速率	0.28	0.86	0.84	-0.23	0.73	0.72	0.82	0.82	0.93 *	0.96 **	0.88	0.99 **
胞间 CO ₂ 浓度	-0.11	0.68	0.72	-0.04	0.73	0.58	0.78	0.63	0.96 *	0.88 *	0.99 **	0.85
气孔导度	-0.01	0.90 *	0.91 *	0.01	0.86	0.80	0.92 *	0.86	0.99 **	1.00 **	0.95 *	0.94 *

指标	相关系数											
	果实硬度	可溶性固形物含量	丙二醛含量	脯氨酸含量	可溶性糖含量	可溶性蛋白含量	总酚含量	总抗氧化能力	蒸腾速率	净光合速率	胞间 CO ₂ 浓度	气孔导度
果实硬度	1.00											
可溶性固形物含量	0.32	1.00										
丙二醛含量	-0.83	-0.23	1.00									
脯氨酸含量	0.78	0.78	-0.78	1.00								
可溶性糖含量	0.85	0.66	-0.88	0.98 **	1.00							
可溶性蛋白含量	0.89 *	0.59	-0.56	0.80	0.79	1.00						
总酚含量	0.91 *	0.63	-0.63	0.86	0.86	0.99 **	1.00					
总抗氧化能力	0.44	0.99 **	-0.33	0.85	0.74	0.69	0.73	1.00				
蒸腾速率	0.93 *	0.60	-0.86	0.96 *	0.98 **	0.87	0.92 *	0.69	1.00			
净光合速率	0.72	0.86	-0.69	0.99 **	0.95 *	0.79	0.85	0.91 *	0.92 *	1.00		
胞间 CO ₂ 浓度	0.84	0.43	-0.98 **	0.89 *	0.95 *	0.63	0.71	0.51	0.93 *	0.82	1.00	
气孔导度	0.88 *	0.67	-0.84	0.98 **	0.99 **	0.85	0.91 *	0.76	0.99 **	0.95 *	0.92 *	1.00

注：* 表示显著相关($P < 0.05$)，** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

$$Z_1 = -0.016 4X_1 + 0.221 6X_2 + 0.223 0X_3 + 0.026 8X_4 + 0.213 7X_5 + 0.204 8X_6 + 0.223 8X_7 + 0.215 6X_8 + 0.226 1X_9 + 0.231 5X_{10} + 0.208 9X_{11} + 0.210 9X_{12} + 0.212 0X_{13} + 0.155 9X_{14} - 0.182 4X_{15} + 0.222 8X_{16} + 0.224 1X_{17} + 0.214 3X_{18} + 0.223 5X_{19} + 0.177 6X_{20} - 0.229 5X_{21} + 0.217 7X_{22} + 0.201 4X_{23} + 0.229 7X_{24};$$

$$Z_2 = -0.510 5X_1 - 0.062 5X_2 - 0.103 1X_3 - 0.512 6X_4 - 0.199 7X_5 - 0.173 2X_6 - 0.132 5X_7 - 0.082 6X_8 + 0.029 9X_9 + 0.042 0X_{10} + 0.063 3X_{11} + 0.214 6X_{12} - 0.202 0X_{13} + 0.331 3X_{14} + 0.047 4X_{15} + 0.141 4X_{16} + 0.079 6X_{17} - 0.123 4X_{18} - 0.081 0X_{19} + 0.278 9X_{20} - 0.005 7X_{21} + 0.182 4X_{22} + 0.030 4X_{23} + 0.046 3X_{24};$$

$$Z_3 = 0.156 5X_1 + 0.204 4X_2 + 0.147 5X_3 + 0.124 5X_4 + 0.067 3X_5 + 0.249 1X_6 + 0.064 1X_7 + 0.249 5X_8 - 0.164 2X_9 - 0.017 8X_{10} - 0.311 3X_{11} - 0.064 2X_{12} - 0.099 2X_{13} + 0.286 7X_{14} + 0.454 0X_{15} - 0.062 6X_{16} - 0.159 6X_{17} + 0.226 9X_{18} + 0.166 2X_{19} + 0.269 2X_{20} - 0.114 1X_{21} + 0.015 5X_{22} - 0.367 0X_{23} - 0.089 9X_{24}。$$

式中: $X_1 \sim X_{24}$ 分别为株高、叶柄长、叶片数、花序数、

结果数、叶面积、叶绿素含量、根茎粗、总质量、单果质量、果实纵径、果实横径、果实硬度、可溶性固形物含量、丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、总酚含量、总抗氧化能力、蒸腾速率、净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度。

由以上表达式可以看出,第1主成分中叶柄长、叶片数、叶绿素、总质量、单果质量、果实硬度、脯氨酸含量、可溶性糖含量、总酚含量、气孔导度的系数较大;第2主成分中果实横径、可溶性固形物含量、总抗氧化能力、净光合速率的系数较大;第3主成分中叶面积、根茎粗、可溶性固形物含量、丙二醛含量、可溶性蛋白含量的系数较大。

以所有综合指标的数值为原始数据进行隶属函数分析,换算成隶属函数值(表4)。对于同一综合指标如 Z_1 ,其中 T_3 处理的 $U(X_1)$ 最大,表现最佳,而清水对照最小,表现最差。根据综合评价值(D 值),对不同浓度槲皮素处理进行排序。结果显示,不同处理按 D 值排序为 40 mg/L 处理 > 80 mg/L 处理 > 20 mg/L 处理 > 清水对照,其 D 值分别为 0.948、0.822、0.592、0.125,说明 40 mg/L 槲皮素是最优处理剂量。

表4 不同浓度槲皮素处理的综合指标值、隶属函数值、 D 值及综合评价

处理	综合指标值			隶属函数值			D 值	D 值排序
	Z_1	Z_2	Z_3	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$		
CK	-7.074	0.700	0.548	0	0.624	0.404	0.125	4
T_1	0.160	2.531	1.503	0.669	0	1.000	0.592	3
T_2	3.177	2.649	0.982	0.949	1.000	0.849	0.948	1
T_3	3.737	0.818	1.973	1.000	0.331	0	0.822	2
权重				0.772	0.152	0.075		

注: Z_1 、 Z_2 和 Z_3 分别表示第1主成分、第2主成分和第3主成分

3 结论与讨论

长江中下游地区在冬季(尤其是12月至次年2月)常有低温弱光,严重影响草莓生产。从遗传学角度分析可知,适合选用耐低温弱光的草莓品种,但选育品种的费用、品种的适应性、生物学潜力的局限性及农民偏好有时会制约其使用;从栽培学角度分析可知,利用化学调控手段喷施主栽草莓品种,提高其耐低温弱光能力是一种简便可行的方式。近年来,植物生物刺激素的使用改善了植物耐逆境的水平^[10]。

槲皮素是一种应用最广泛的植物生物类黄酮,

常存在于果树、蔬菜中,有较强的抗氧化、抗逆能力,有望成为植物生物刺激素^[14]。外源应用槲皮素能减轻猕猴桃叶片在夏季所受的高温强光的灼伤^[15]、延缓苹果果实衰老^[16]、延迟猕猴桃果实软化、抑制扩展青霉的发生^[17]、吸收 UV-B 光以保护豌豆幼苗^[5]、提高渗透胁迫下罗布麻种子的发芽率和活力^[4]、缓解番茄盐胁迫^[3] 和百草枯毒性作用^[18]。

槲皮素处理能有效增加草莓的结果数和单果质量,同时不同浓度的槲皮素显著增加了草莓叶面积、叶柄长和根茎粗,这与槲皮素处理增加番茄幼苗茎高、茎围和根长^[6] 并提高罗布麻种子的发芽

率、茎长、根长、干质量和鲜质量的结果^[7]相同。

槲皮素能够提高植株的光合特性。逆境胁迫会破坏叶绿体和类囊体膜结构,降低叶绿素合成和气孔导度,减少水分蒸腾,使光合作用降低。在本研究中,施用外源槲皮素增加了草莓叶片叶绿素含量,这与对番茄、罗布麻和小麦幼苗的研究结果相同^[4,6-7];槲皮素显著促进了草莓植株的光合作用,其中 40 mg/L 槲皮素显著提高了净光合速率。各浓度槲皮素处理均提高了胞间 CO₂ 浓度、气孔导度和蒸腾速率。槲皮素可以通过诱导类囊体膜的结构变化,影响电子传递,调控气孔开放的信号通路,消除光抑制和对光合机构膜的损伤,导致光合效率提高^[5]。

相关生理生化指标包括丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、抗氧化能力和总酚含量等植物应对逆境的指标。本研究发现,随着槲皮素浓度升高,草莓体内的脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白含量呈递增趋势,而丙二醛含量显著降低,都有效减少了逆境中植株细胞受损;总抗氧化能力和酚类化合物总量与对照有显著差异($P < 0.05$),这与小麦幼苗中应用槲皮素增加了总抗氧化能力、酚类化合物总量的结果^[17]相同。植物抗性的增加与多种因素有关,例如不良环境下植物体内活性氧的动态平衡被打破,植物就会启动保护系统,清除过剩的自由基;脯氨酸含量提高会降低活性氧的水平,抑制丙二醛含量增加,从而减轻细胞膜脂过氧化,这与酚类捕获活性氧的活力的作用相似;可溶性糖、可溶性蛋白含量的增加提高了草莓的代谢反应,以产生更多的渗透调节物质来缓解不良环境尤其是低温弱光的伤害。

槲皮素以剂量依赖性的方式起作用,而最佳剂量证明对植物是有益的^[18]。由本试验结果可知,40 mg/L 槲皮素能够有效提高净光合速率、减少细胞膜损伤、提高草莓植株生长和抗性能力,可用于冬春季草莓生产。

参考文献:

- [1] 杨颖,王芸芸,蒋琦辰. 槲皮素药理作用的研究进展[J]. 特种经济动植物,2020,23(5):24-28.
- [2] Brunetti C, Fini A, Sebastiani F, et al. Modulation of phytohormone signaling: a primary function of flavonoids in plant - environment

- Interactions[J]. *Frontiers in Plant Science*,2018,9:1042.
- [3] Kobylińska A. Exogenous quercetin as a proliferation stimulator in tobacco BY-2 cells[J]. *Journal Elementology*,2017,22(1):245-258.
- [4] Jańczak - Pieniążek M, Migut D, Piechowiak T, et al. The effect of exogenous application of quercetin derivative solutions on the course of physiological and biochemical processes in wheat seedlings[J]. *International Journal of Molecular Sciences*,2021,22(13):6882.
- [5] Dobrikova A G, Apostolova E L. Damage and protection of the photosynthetic apparatus from UV - B radiation. II. Effect of quercetin at different pH[J]. *Journal Plant Physiology*,2015,184:98-105.
- [6] Parvin K, Hasanuzzaman M, Bhuyan M H M B, et al. Quercetin mediated salt tolerance in tomato through the enhancement of plant antioxidant defense and glyoxalase systems[J]. *Plants*,2019,8(8):247.
- [7] Yang J L, Zhang L X, Jiang L, et al. Quercetin alleviates seed germination and growth inhibition in *Apocynum venetum* and *Apocynum pictum* under mannitol - induced osmotic stress[J]. *Plant Physiology Biochemistry*,2021,159:268-276.
- [8] Fischer C, Speth V, Fleig - Eberenz S, et al. Induction of zygotic polyembryos in wheat; influence of auxin polar transport[J]. *The Plant Cell*,1997,9(10):1767-1780.
- [9] 谢尚强,王文霞,张付云,等. 植物生物刺激素研究进展[J]. 中国生物防治学报,2019,35(3):487-496.
- [10] Jacobs M, Rubery P H. Naturally occurring auxin transport regulators[J]. *Science*,1988,241(4863):346-349.
- [11] Peer W A, Murphy A S. Flavonoids and auxin transport: modulators or regulators? [J]. *Trends in Plant Science*,2007,12(12):556-563.
- [12] Maloney G S, DiNapoli K T, Muday G K. The anthocyanin reduced tomato mutant demonstrates the role of flavonols in tomato lateral root and root hair development[J]. *Plant Physiology*,2014,166(2):614-631.
- [13] 靳俊婷,索晓静,丁红元,等. 黄酮醇在果树中的功能的研究进展[J]. 河北果树,2021(4):1-3,15.
- [14] 庄武豹,姚康有,杨妙贤,等. 槲皮素对猕猴桃高温强光伤害的缓解作用[J]. 园艺学报,2009,36(6):787-792.
- [15] 王龙. 外源槲皮素对苹果果实衰老的影响及其生理机制[D]. 保定:河北农业大学,2003.
- [16] 张美丽. 银杏叶粗提物和槲皮素诱导猕猴桃果实对青霉病的抗性研究[D]. 杨凌:西北农林科学大学,2016.
- [17] Singh P, Arif Y, Bajguz A, et al. The role of quercetin in plants[J]. *Plant Physiology Biochemistry*,2021,166:10-19.
- [18] Ylstra B, Touraev A, Moreno R M B, et al. Flavonols stimulate development, germination, and tube growth of tobacco pollen[J]. *Plant Physiology*,1992,100(2):902-907.