

· 中药农业 ·

不同光质对甘草苗期生长及活性成分含量的影响[△]

陈莹, 张铮茹, 张远帆, 王桂荣, 白钰, 张雯潇, 孙志蓉*

北京中医药大学 中药学院, 北京 102488

[摘要] 目的: 探究不同光质对甘草苗期生长及活性成分积累的影响特征。方法: 采用白光(对照)、红光、蓝光、红蓝光(红光: 蓝光=2: 1)和蓝红光(蓝光: 红光=2: 1)5种光质处理甘草, 分别在光质处理36、106 d测定甘草的生长指标, 建立甘草根部12个活性成分含量的测定方法, 结合聚类分析探析不同光质对甘草活性成分积累的影响特征。结果: 红光促进甘草株高增长的作用较其他光质大, 红光下甘草株高比对照高40.9%~45.1%; 红蓝光促进甘草根部生长的作用明显, 不同光质下甘草根长、根粗和根干质量增长量变化趋势一致, 均为红蓝光>红光>白光>蓝红光>蓝光; 不同光质处理106 d甘草的根冠比均大于处理36 d, 红蓝光处理106 d甘草的根冠比最大, 是对照的2.8倍。聚类分析结果表明, 甘草的活性成分随不同光质处理时间的延长而增大, 不同光质下甘草酸、蔗糖异甘草苷、异甘草苷等9个活性成分含量随不同光质处理时间的增加呈升高趋势。红蓝光促进甘草中甘草酸、蔗糖异甘草苷、异甘草苷、异甘草素、新异甘草苷、甘草素和甘草苷积累的作用较其他光质大, 分别比对照高88.24%、17.39%、284.31%、156.95%、246.35%、89.06%和207.40%; 蓝红光促进甘草中甘草苷、甘草素、甘草酸和异甘草素积累的作用较大, 分别比对照高12.42%、3.00%、7.07%和5.41%; 增加蓝光比例有利于甘草中甘草查耳酮A的积累, 红光处理36 d促进山柰酚和刺甘草查耳酮的积累, 处理106 d抑制以上2个成分的积累。结论: 红光对甘草地上部生长有较强促进作用, 红蓝光可以显著促进甘草根系的生长和生物量积累; 红光和蓝光混合光质较红光或蓝光单色光质对甘草中多种活性成分积累的促进作用更大, 以红蓝光处理更佳, 红蓝光与甘草中异甘草素、甘草素和甘草苷的积累呈正相关。为光质在甘草次生代谢成分的定向培育应用提供参考。

[关键词] 甘草; 光质; 生长; 活性成分; 特征**[中图分类号]** R282.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-4890(2023)01-0123-14**doi:**10.13313/j.issn.1673-4890.20221108001Light Quality Affects Growth and Active Component Content of *Glycyrrhiza uralensis* Seedlings

CHEN Ying, ZHANG Zheng-ru, ZHANG Yuan-fan, WANG Gui-rong, BAI Yu, ZHANG Wen-xiao, SUN Zhi-rong*

School of Chinese Materia Medica, Beijing University of Chinese Medicine, Beijing 102488, China

[Abstract] **Objective:** To explore the effects of different light qualities on the growth and active component accumulation of *Glycyrrhiza uralensis* seedlings. **Methods:** The seedlings of *G. uralensis* were treated with white light (W, control), red light (R), blue light (B), red-blue light (R : B=2 : 1), and blue-red light (B : R=2 : 1), respectively. The growth indexes of *G. uralensis* were determined after 36 days and 106 days, respectively. A method for determining multiple components in *G. uralensis* was established. Cluster analysis was employed to analyze the effects of different light qualities on the accumulation of active components in *G. uralensis*. **Results:** Red light had stronger effect on the plant height of *G. uralensis* than other light qualities, and the plant height of *G. uralensis* exposed to red light was 40.9%-45.1% higher than that of the control. Red-blue light significantly promoted the root growth. The root length, root diameter, and dry root weight of *G. uralensis* exposed to different light qualities followed the same trend of red-blue light>red light>white light>blue-red light>blue light. The root-to-shoot ratio of *G. uralensis* treated for 106 days was higher than that treated for 36 days. Particularly, the root-to-shoot ratio of *G. uralensis* exposed to red-blue light for 106 days was 2.8 times that of the control. The results of cluster analysis showed that the differences in active component content between different light treatments

[△] [基金项目] 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目

* [通信作者] 孙志蓉, 教授, 研究方向: 中药资源质量与开发; E-mail: zrs67@126.com

increased with the extension of treatment time. The content of the other nine active components except echinatin, kaempferol, and licochalcone A in *G. uralensis* increased with the extension of treatment time. Red-blue light showed the strongest promoting effect on the accumulation of glycyrrhizic acid, isoliquiritin apioside, isoliquiritin, isoliquiritigenin, neoisoliquiritigenin, liquiritigenin, and liquiritin in *G. uralensis*, which were 88.24%, 17.39%, 284.31%, 156.95%, 246.35%, 89.06%, and 207.40% higher than that of the control, respectively. Blue-red light promoted the accumulation of liquiritin, liquiritigenin, glycyrrhizic acid, and isoliquiritigenin, which were 12.42%, 3.00%, 7.07%, and 5.41% higher than that of the control, respectively. Increasing the proportion of blue light was beneficial to the accumulation of licochalcone A in *G. uralensis*. Red light treatment for 36 days promoted the accumulation of kaempferol and echinatin, while that for 106 days inhibited the accumulation of the above two components. **Conclusion:** Red light had a strong promoting effect on the growth of the aboveground part of *G. uralensis*. Red-blue light can significantly promote the growth and biomass accumulation of *G. uralensis* root. The mixtures of red light and blue light, especially red-blue light, had greater effect on the accumulation of active components in *G. uralensis* than red light or blue light alone. Red-blue light had a positive correlation with the accumulation of isoliquiritigenin, liquiritigenin, and liquiritin. The findings of this study provide a reference for the application of different light qualities in the directed cultivation of *G. uralensis* for the accumulation of secondary metabolites.

[Keywords] *Glycyrrhiza uralensis* Fisch.; light quality; growth; active component; characteristic

甘草 *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. 为豆科甘草属多年生草本植物, 以干燥根和根茎入药, 具有补脾益气、清热解毒、调和诸药的功效^[1], 素有“十方九草, 无草不成方”之说^[2], 是临床常用大宗药材, 还可作为食品添加剂、烟草矫味剂等工业原料^[3]。甘草中三萜类化合物甘草酸具有抗病毒活性, 黄酮类化合物甘草苷、甘草素、异甘草素等具有抗氧化、降血糖、调血脂等药理活性^[4-6]。野生甘草是我国二级重点保护植物, 目前人工栽培甘草是市场上甘草药材商品的主要来源^[7]。研究发现, 部分栽培甘草的甘草酸含量难以达到《中华人民共和国药典》2020年版规定的标准^[8-9], 如何提高栽培甘草的质量是保证其临床疗效和资源可持续利用的关键问题。

甘草分布于我国温带干旱、半干旱区和暖温带、寒温带大陆性季风气候区, 是典型的喜光植物^[10-11]。光为植物光合作用提供辐射能, 还为植物生长发育提供调控信号, 光强、光质等光信号可以通过植物光受体的转导与内生发育程序整合调控植物的生长发育^[12]。光质是影响植物光合作用的因素之一, 叶绿素在 430 nm (蓝光) 和 680 nm (红光) 吸收较强, 蓝光和红光能促进植物气孔的开张, 蓝光有利于叶绿体的发育, 红光有利于光合产物的积累^[13], 蓝光对三萜皂苷合成关键酶——细胞色素 P450 酶可能有激活作用^[14]。光质是影响植物生长和次生代谢成分合成的因素之一, 已有研究表明, 药用植物如丹参、黄芪、重楼等在蓝光、红光或红蓝光下, 活性成分(如黄酮、皂苷和多糖类成分)含量显著提高^[15-17]。甘草分布区

太阳辐射强度具有显著差别, 直射辐射和散射辐射的组成比例也有一定差异, 可见甘草不同分布区的光质之间存在一定差别^[18]。已有研究表明, 蓝色滤光膜下甘草的甘草酸和甘草苷含量较高^[19], 光质对人参发状根、三七细胞悬浮物中三萜皂苷的积累有不同程度的促进作用^[14], 蓝光促进植物叶中黄酮类化合物的积累^[20]。光质对甘草完整植株中三萜类化合物和根中黄酮类化合物的影响研究较少, 且其中甘草酸和甘草苷含量随植株生长发育时期动态变化^[21]。因此, 本研究以甘草幼苗为研究对象, 考察白光、红光、蓝光、红蓝光(红光: 蓝光=2: 1)和蓝红光(蓝光: 红光=2: 1)5种光质对甘草苗期生长和活性成分积累的影响, 结合聚类分析探讨不同光质对甘草活性成分的影响特征, 为光质在甘草生长和活性成分提升方面的研究和应用提供参考。

1 材料

甘草种子由中国中药有限公司提供, 经北京中医药大学中药学院孙志蓉教授鉴定为豆科植物甘草 *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. 的种子。

LED光源(北京盛阳谷科技有限公司); LC-20AT型高效液相色谱仪(日本岛津公司); KQ-500DE型数控超声波清洗仪(昆山市超声仪器有限公司); BSA124S型万分之一电子天平、SQP型十万分之一电子天平(北京赛多利斯科学仪器有限公司); SP-742D型高速粉碎机(广州市兆利电器实业有限公司)。

对照品芹糖甘草苷(批号: R03A9F67328)、甘草苷(批号: Z13J11X108109)、刺芒柄花苷(批号: P03A10F84910)、甘草酸(批号: Y02J11L113432)、山柰酚(批号: G11A11L110978)、芹糖异甘草苷(批号: P05D9L74387)、异甘草苷(批号: Y15A10H95344)、新异甘草苷(批号: M31A9S69020)、刺甘草查耳酮(批号: Y11D11W134207)、异甘草素(批号: H03D9Z76567)、甘草查耳酮A(批号: P21O8F46473)均购自上海源叶生物科技有限公司; 甘草素(批号: C10828731, 上海麦克林生化科技有限公司), 以上对照品纯度均 $\geq 98\%$; 乙腈、甲醇均购自美国Fisher Chemical公司, 甲酸(上海麦克林生化科技有限公司), 均为色谱纯; 水为娃哈哈纯净水; 其余试剂均为分析纯。

2 方法

2.1 幼苗培养

甘草采用聚乙烯塑料盆(上口径16.0 cm、下口径13.0 cm、高17.5 cm)盆栽, 每盆装沙土2.6 kg。于2021年5月7日播种, 在人工气候室内进行培养。播种后4~5 d出苗, 甘草种子萌发期培养条件为光周期12 h, 温度(25 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度(60 $\pm$ 5)%; 暗周期12 h, 温度(20 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度(40 $\pm$ 5) %。5月21日甘草幼苗长至2片真叶时, 每盆留苗15株, 培养条件为光周期14 h, 温度(25 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度(60 $\pm$ 5)%; 暗周期10 h, 温度(20 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度(40 $\pm$ 5) %。营养液参照Hoagland营养液配方加以改进^[22], 每14 d施用营养液400 mL, 视土壤情况浇水保证甘草的正常生长。甘草幼苗在白光下培育38 d后分为5组, 分别置于白光(对照, 波长: 300~800 nm)、红光(波长: 600~699 nm)、蓝红光、红蓝光和蓝光(波长: 400~499 nm)光源下培养, 光照强度为430 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 各处理间用不透光、不反光的遮光布隔开。分别于2021年7月和9月下旬取样, 即分别在不同光质下处理36、106 d取样, 测定生长指标, 将甘草根部于60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重后粉碎, 过40目筛, 备用(表1)。

2.2 生长指标测定

甘草取样后冲洗干净, 用吸水纸吸去多余水分, 测量甘草根部和地上部分的长度、根部芦头直径(根粗), 将甘草根部和地上部于60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重后, 分别用电子天平称定质量, 每组重复4次。按

表1 甘草样品信息

样品编号	光照环境	处理时间/d
W1	白光	36
R1	红光	36
B1	蓝光	36
RB1	红蓝光	36
BR1	蓝红光	36
W2	白光	106
R2	红光	106
B2	蓝光	106
RB2	红蓝光	106
BR2	蓝红光	106

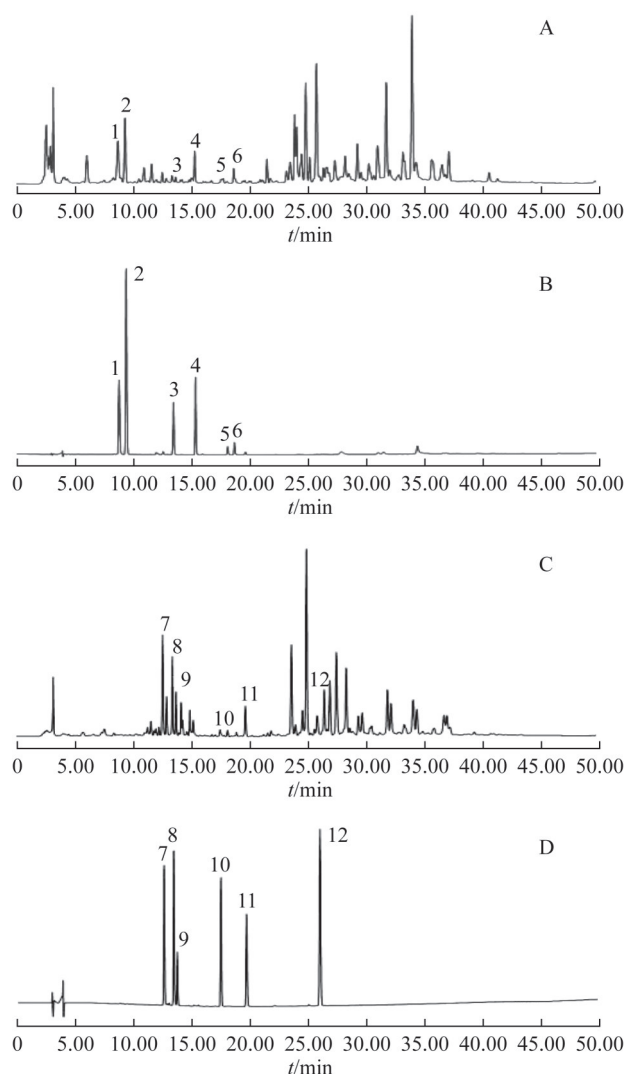
公式(1)计算根冠比。

$$\text{根冠比} = \text{根部干质量} / \text{地上部干质量} \quad (1)$$

2.3 甘草活性成分含量测定

2.3.1 色谱条件 采用Agilent 5 TC-C₁₈色谱柱(250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μm); 流动相为乙腈(A) -0.5%甲酸水(B), 梯度洗脱(0~6 min, 20%~30%A; 6~10 min, 30%~42%A; 10~20 min, 42%~60%A; 20~36 min, 60%~80%A; 36~40 min, 80%A; 40~48 min, 80%~90%A; 48~51 min, 90%A); 流速为1 mL $\cdot\text{min}^{-1}$; 柱温为30 $^{\circ}\text{C}$; 进样量为20 μL ; 芹糖甘草苷、甘草苷、刺芒柄花苷、甘草素、山柰酚、甘草酸检测波长为280 nm; 芹糖异甘草苷、异甘草苷、新异甘草苷、刺甘草查耳酮、异甘草素和甘草查耳酮A检测波长为355 nm。甘草根部样品与对照品的色谱图见图1。

2.3.2 对照品溶液制备 分别精密称取芹糖甘草苷、甘草苷、刺芒柄花苷、甘草素、山柰酚、甘草酸、芹糖异甘草苷、异甘草苷、新异甘草苷、刺甘草查耳酮、异甘草素和甘草查耳酮A适量, 分别用适量甲醇制备成质量浓度为0.500、0.610、0.582、0.546、0.580、0.610、0.405、0.570、0.800、0.465、0.560、0.502 mg $\cdot\text{mL}^{-1}$ 的单一对照品溶液。分别精密吸取适量芹糖甘草苷、甘草苷、刺芒柄花苷、甘草素、山柰酚和甘草酸对照品溶液, 用适量60%甲醇配制成质量浓度分别为50.000、81.740、15.132、19.656、5.800、97.600 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的混合对照品储备液1; 分别精密吸取适量芹糖异甘草苷、异甘草苷、新异甘草苷、刺甘草查耳酮、异甘草素和甘草查耳酮A溶液, 用适量60%甲醇配制成质量浓度分别为16.200、11.400、11.200、3.720、4.480、6.024 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的混合对照品储备液2。



注: A. 样品 (280 nm); B. 对照品 (280 nm); C. 样品 (355 nm); D. 对照品 (355 nm); 1. 蔗糖甘草苷; 2. 甘草苷; 3. 刺芒柄花苷; 4. 甘草素; 5. 山柰酚; 6. 甘草酸; 7. 蔗糖异甘草苷; 8. 异甘草苷; 9. 新异甘草苷; 10. 刺甘草查耳酮; 11. 异甘草素; 12. 甘草查耳酮A。

图1 甘草根样品和对照品HPLC图

2.3.3 供试品溶液制备 精密称取甘草样品粉末0.1 g, 置于15 mL离心管中, 加入70%乙醇10 mL, 密塞, 40 °C恒温超声提取40 min (功率500 W, 频率50 kHz), 放冷, 称定质量, 用70%乙醇补足减少的质量, 摇匀, 6000 r·min⁻¹离心10 min (离心半径为3 cm), 取上清液过0.22 μm微孔滤膜, 取续滤液作为供试品溶液。

2.3.4 方法学考察

2.3.4.1 线性关系考察 分别精密吸取2.3.2项下方法制备的对照品储备液1、2各0.600、0.400、0.200、0.100、0.050、0.025、0.010、0.005 mL于1 mL量瓶中, 分别用60%甲醇定容至刻度, 得系列对照品溶液。分别精密吸取以上对照品溶液20 μL, 按2.3.1项下色谱条件进样, 以质量浓度为横坐标(X), 以各成分的峰面积为纵坐标(Y), 绘制标准曲线。按3倍信噪比计算各成分的检测限(LOD), 按10倍信噪比计算各成分的定量限(LOQ)。待测成分在线性范围内线性良好, *r*均在0.999以上(表2)。

2.3.4.2 精密度试验 分别精密吸取稀释5倍的混合对照品储备液1、2各20 μL, 分别连续进样6次, 计算各成分峰面积RSD为0.04%~2.60%, 表明仪器的精密度良好。

2.3.4.3 稳定性试验 甘草样品(W1)供试品溶液分别于0、2、4、6、8、24 h进样20 μL, 计算各成分峰面积RSD为0.20%~2.38%, 表明供试品溶液在24 h内稳定。

2.3.4.4 重复性试验 分别精密称取甘草样品(W1)粉末6份, 按2.3.3项下方法制备供试品溶液, 分别进样, 测定峰面积, 计算各成分含量RSD

表2 甘草中12个成分线性关系

成分	回归方程	线性范围/μg·mL ⁻¹	<i>r</i>	LOD/μg·mL ⁻¹	LOQ/μg·mL ⁻¹
蔗糖甘草苷	$Y=25\,825\,604.631X-3\,947.719$	0.250~50.000	0.999 9	0.063	0.125
甘草苷	$Y=34\,814\,158.379X-7\,914.439$	0.409~81.740	0.999 9	0.115	0.230
刺芒柄花苷	$Y=3\,980\,616.813X-1\,727.445$	0.076~15.132	0.999 9	0.024	0.048
甘草素	$Y=53\,916\,256.871X-3\,314.605$	0.098~19.656	0.999 9	0.045	0.090
山柰酚	$Y=29\,282\,496.192X-569.250$	0.029~5.800	0.999 9	0.014	0.028
甘草酸	$Y=1\,591\,413.182X-419.107$	0.488~97.600	0.999 9	0.240	0.480
蔗糖异甘草苷	$Y=40\,923\,288.942X-3\,889.656$	0.081~16.200	0.999 8	0.021	0.041
异甘草苷	$Y=67\,267\,879.668X-4\,597.628$	0.057~11.400	0.999 8	0.015	0.029
新异甘草苷	$Y=44\,683\,706.795X-4\,372.564$	0.056~11.200	0.999 7	0.027	0.054
刺甘草查耳酮	$Y=62\,855\,210.153X-784.345$	0.019~3.720	0.999 9	0.009	0.018
异甘草素	$Y=107\,895\,644.458X-2\,465.138$	0.022~4.480	0.999 9	0.010	0.020
甘草查耳酮A	$Y=65\,669\,792.433X-1\,166.071$	0.030~6.024	0.999 9	0.014	0.028

为 0.07%~4.48%，表明该方法重复性良好。

2.3.4.5 加样回收率试验 分别精密称取已知含量的甘草样品（W1）粉末各 0.05 g，共 9 份，每 3 份分别加入已知含量 80%、100% 和 120% 的各对照品，

按 **2.3.3** 项下方法制备供试品溶液，在 **2.3.1** 项色谱条件下测定含量，计算各成分平均加样回收率为 88.40%~105.65%、RSD 为 0.67%~6.33%（表 3），表明各成分加样回收率良好。

表 3 甘草中 12 个成分加样回收率试验结果

成分	称样量/g	样品中含量/ μg	对照品加入量/ μg	测得量/ μg	回收率/%	平均回收率/%	RSD/%
芹糖甘草苷	0.054 9	51.68	41.23	90.39	93.89	95.88	5.54
	0.053 3	51.52	41.40	89.98	92.89		
	0.054 4	51.65	41.26	89.83	92.54		
	0.053 2	51.52	51.73	99.00	91.78		
	0.052 7	51.50	51.75	98.93	91.65		
	0.053 8	51.60	51.64	98.84	91.48		
	0.051 8	51.46	62.09	115.45	103.06		
	0.051 3	51.44	62.12	115.30	102.80		
	0.054 3	51.64	61.92	115.31	102.83		
甘草苷	0.054 9	68.95	53.62	117.33	90.23	92.77	3.18
	0.053 3	68.85	53.74	117.26	90.09		
	0.054 4	68.91	53.67	117.27	90.11		
	0.053 2	68.84	68.37	134.95	96.69		
	0.052 7	68.78	68.44	134.88	96.58		
	0.053 8	68.88	68.33	134.87	96.57		
	0.051 8	68.65	80.79	142.70	91.66		
	0.051 3	68.52	80.93	142.57	91.50		
	0.054 3	68.90	80.52	142.59	91.52		
刺芒柄花苷	0.054 9	10.82	8.51	19.85	106.11	101.84	3.35
	0.053 3	10.73	8.59	19.84	106.05		
	0.054 4	10.79	8.54	19.89	106.55		
	0.053 2	10.71	10.71	21.28	98.69		
	0.052 7	10.68	10.74	21.27	98.62		
	0.053 8	10.75	10.66	21.26	98.59		
	0.051 8	10.64	12.87	23.62	100.87		
	0.051 3	10.62	12.89	23.58	100.52		
	0.054 3	10.78	12.73	23.58	100.55		
甘草素	0.054 9	9.18	7.73	17.28	104.79	105.65	0.67
	0.053 3	9.04	7.86	17.29	104.95		
	0.054 4	9.15	7.76	17.31	105.15		
	0.053 2	9.04	9.82	19.41	105.60		
	0.052 7	9.01	9.85	19.40	105.48		
	0.053 8	9.08	9.79	19.39	105.31		
	0.051 8	8.98	11.85	21.58	106.33		
	0.051 3	8.96	11.87	21.60	106.49		
	0.054 3	9.14	11.70	21.63	106.75		
山柰酚	0.054 9	4.85	3.60	7.96	86.39	92.54	6.22
	0.053 3	4.76	3.71	8.00	87.33		
	0.054 4	4.83	3.64	8.25	93.96		
	0.053 2	4.75	4.88	9.02	87.50		
	0.052 7	4.71	4.93	9.12	89.45		
	0.053 8	4.78	4.85	9.11	89.29		

续表 3

成分	称样量/g	样品中含量/ μg	对照品加入量/ μg	测得量/ μg	回收率/%	平均回收率/%	RSD/%
甘草酸	0.051 8	4.68	5.88	10.58	100.34	91.45	4.75
	0.051 3	4.66	5.90	10.51	99.15		
	0.054 3	4.83	5.73	10.53	99.48		
	0.054 9	193.47	154.49	331.40	89.28		
	0.053 3	193.34	154.63	330.36	88.61		
	0.054 4	193.46	154.52	337.19	93.02		
	0.053 2	193.32	193.32	367.00	89.84		
	0.052 7	193.29	193.35	370.61	91.71		
	0.053 8	193.36	193.29	369.99	91.38		
	0.051 8	193.25	232.06	410.60	93.66		
芹糖异甘草苷	0.051 3	193.22	232.10	408.47	92.74	99.29	3.56
	0.054 3	193.46	231.85	408.59	92.79		
	0.054 9	20.19	16.44	37.30	104.08		
	0.053 3	20.10	16.53	37.28	103.93		
	0.054 4	20.16	16.47	37.29	104.01		
	0.053 2	20.10	20.58	40.05	96.95		
	0.052 7	20.06	20.62	40.03	96.86		
	0.053 8	20.13	20.55	40.02	96.79		
	0.051 8	20.01	24.72	44.00	97.05		
	0.051 3	19.98	24.75	43.98	96.98		
异甘草苷	0.054 3	20.16	24.56	43.98	96.99	103.86	5.94
	0.054 9	12.31	9.25	22.33	108.29		
	0.053 3	12.21	9.35	22.34	108.34		
	0.054 4	12.28	9.28	22.34	108.41		
	0.053 2	12.21	11.63	24.73	107.65		
	0.052 7	12.18	11.66	24.72	107.55		
	0.053 8	12.24	11.60	24.72	107.59		
	0.051 8	12.15	14.19	25.73	95.70		
	0.051 3	12.11	14.23	25.72	95.64		
	0.054 3	12.27	14.07	25.72	95.60		
新异甘草苷	0.054 9	13.56	10.66	22.98	88.37	88.40	1.50
	0.053 3	13.46	10.77	22.97	88.30		
	0.054 4	13.52	10.71	22.95	88.05		
	0.053 2	13.45	13.48	25.20	87.17		
	0.052 7	13.40	13.54	25.18	87.01		
	0.053 8	13.48	13.44	25.14	86.76		
	0.051 8	13.39	16.23	28.04	90.26		
	0.051 3	13.35	16.28	28.03	90.17		
	0.054 3	13.52	16.09	27.92	89.50		
	0.054 9	3.79	3.07	6.77	97.07		
刺甘草查耳酮	0.053 3	3.68	3.18	6.75	96.54	96.09	5.22
	0.054 4	3.76	3.10	6.75	96.45		
	0.053 2	3.68	3.93	7.22	90.09		
	0.052 7	3.63	3.98	7.21	89.98		
	0.053 8	3.70	3.91	7.22	90.03		
	0.051 8	3.60	4.74	8.42	101.69		
	0.051 3	3.57	4.78	8.41	101.26		

续表 3

成分	称样量/g	样品中含量/ μg	对照品加入量/ μg	测得量/ μg	回收率/%	平均回收率/%	RSD/%
异甘草素	0.054 3	3.75	4.60	8.43	101.74	92.59	6.33
	0.054 9	2.57	2.03	4.56	98.03		
	0.053 3	2.43	2.17	4.56	98.16		
	0.054 4	2.54	2.06	4.56	98.06		
	0.053 2	2.42	2.74	5.02	94.89		
	0.052 7	2.38	2.79	5.02	94.62		
	0.053 8	2.47	2.69	5.01	94.42		
	0.051 8	2.34	3.29	5.14	85.11		
甘草查耳酮A	0.051 3	2.30	3.34	5.14	85.03	103.21	3.43
	0.054 3	2.54	3.06	5.14	84.96		
	0.054 9	0.70	0.46	1.18	104.35		
	0.053 3	0.60	0.56	1.18	103.57		
	0.054 4	0.67	0.50	1.19	104.00		
	0.053 2	0.60	0.68	1.33	107.35		
	0.052 7	0.57	0.71	1.33	107.04		
	0.053 8	0.64	0.65	1.33	106.15		
	0.051 8	0.53	0.89	1.41	98.88		
	0.051 3	0.51	0.91	1.41	98.90		
	0.054 3	0.66	0.76	1.41	98.68		

2.3.5 样品含量测定 分别精密称取不同光质下处理不同时间甘草样品粉末各 0.1 g, 按 2.3.3 项下方法制备供试品溶液, 进样 20 μL , 测定各成分峰面积, 采用外标法计算各成分含量。

2.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件处理数据, 采用 SPSS 20.0 软件对各指标进行多重比较分析, 运用 TBtools v 1.098728 软件对不同光质下处理不同时间甘草样品进行聚类分析。

3 结果

3.1 不同光质对甘草生长的影响

不同光质处理不同时间甘草幼苗如图 2 所示, 不同光质下甘草生长指标测定结果见图 3。不同光质处理 106 d 各组甘草地上部的生长和干质量差异变大, 红光处理 106 d 甘草的株高显著高于对照, 比对照的株高显著多 40.9%, 其次是红蓝光处理 106 d 甘草的株高比对照高 15.3%, 红光、红蓝光处理 36 d 甘草的株高均较大, 分别比对照多 45.1%、53.8%, 说明红光和红蓝光均促进甘草株高的增长; 红光对甘草地上部干质量的影响较其他光质大, 不同光质处理 106 d 甘草的地上部干质量为红光>白光>红蓝光>蓝光>蓝红光, 红光处理 106 d 甘草的地上部干质

量比对照显著高 5.6%, 不同光质处理 36 d 甘草地上部干质量与对照差异无统计学意义。

不同光质对甘草根部生长和干质量的影响随光质处理时间的延长增大, 除红蓝光处理 106 d 甘草的根长比对照显著多 24.1%, 其余光质处理 106 d 甘草的根长与对照差异无统计学意义; 红蓝光处理 106 d 甘草的根粗最大, 比对照的根粗显著多 23.0%, 其余光质处理 106 d 甘草的根粗与对照差异无统计学意义; 不同光质处理 106 d 甘草的根干质量为红蓝光>红光>白光>蓝光>蓝红光, 红蓝光处理 106 d 甘草的根干质量比对照显著多 85.2%; 不同光质处理 36 d 各组甘草的根长、根粗和根干质量与对照差异无统计学意义, 说明红蓝光对甘草根部生长的促进作用随处理时间的延长较其他光质大。不同光质处理 106 d 各组甘草的根冠比差异变大, 红蓝光处理 106 d 甘草的根冠比是对照的 2.8 倍, 其次蓝红光和蓝光处理 106 d 甘草的根冠比约是对照的 1.2 倍; 蓝光和蓝红光处理 36 d 甘草的根冠比与对照差异无统计学意义, 红蓝光处理 36 d 甘草的根冠比低于对照, 说明红蓝光处理 106 d 较处理 36 d 对甘草根部生物量积累的促进作用大于地上部。

3.2 不同光质对甘草活性成分含量的影响

甘草酸是五环三萜类化合物, 是甘草中主要活

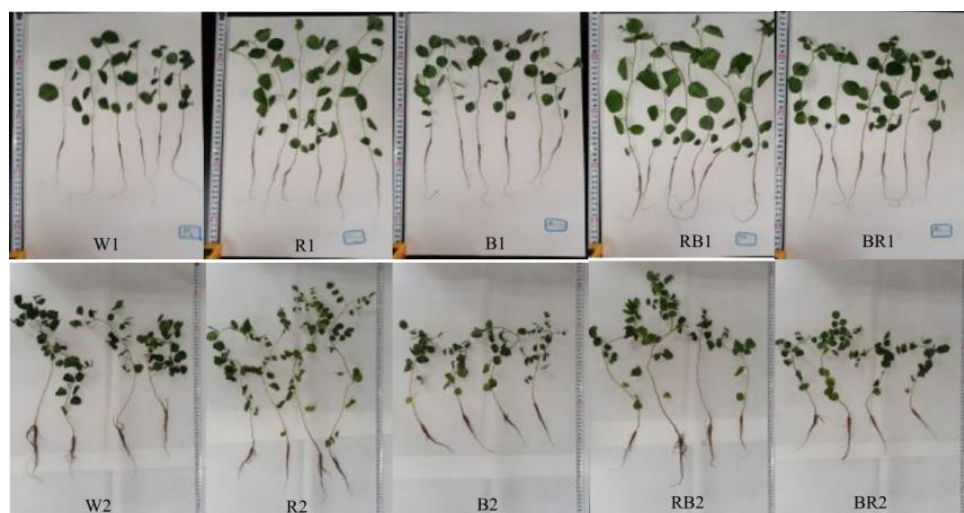
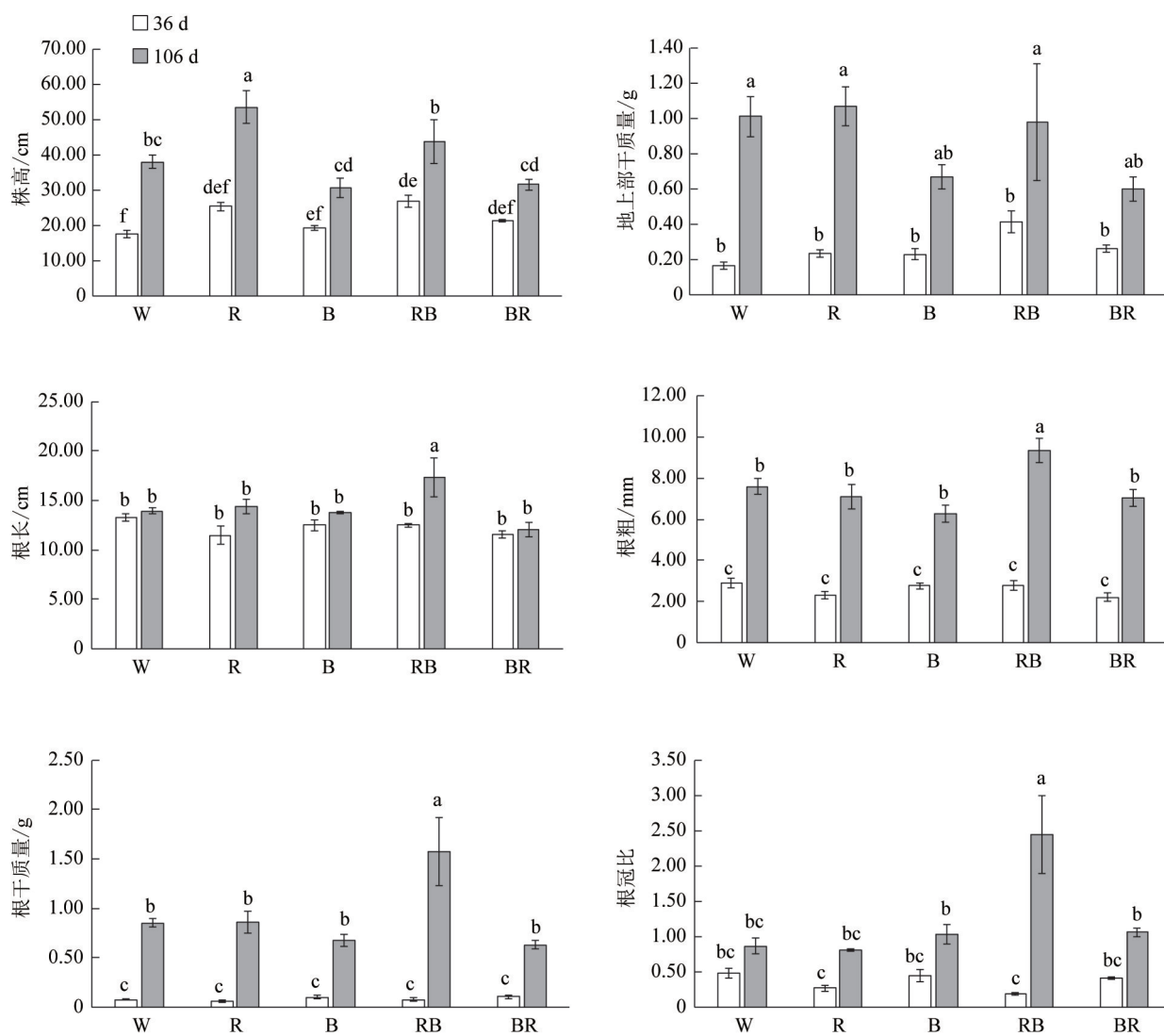


图2 不同光质处理不同时间甘草幼苗



注: W. 白光; R. 红光; B. 蓝光; RB. 红蓝光; BR. 蓝红光; 不同小写字母表示同一指标 $P < 0.05$; 图4~图7同。

图3 不同光质对甘草生长的影响 ($\bar{x} \pm s$, $n=4$)

性成分之一。如图4所示,不同光质处理36、106 d各组甘草的甘草酸质量分数为红蓝光>蓝红光>白光>红光>蓝光,光质处理106 d各组甘草的甘草酸质量分数差异增大,红蓝光、蓝红光处理106 d甘草的甘草酸质量分数分别比对照显著高88.24%、7.07%,说明红蓝光和蓝红光均促进甘草中甘草酸的积累。

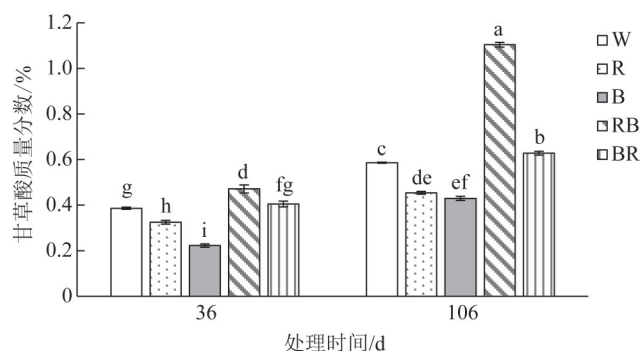
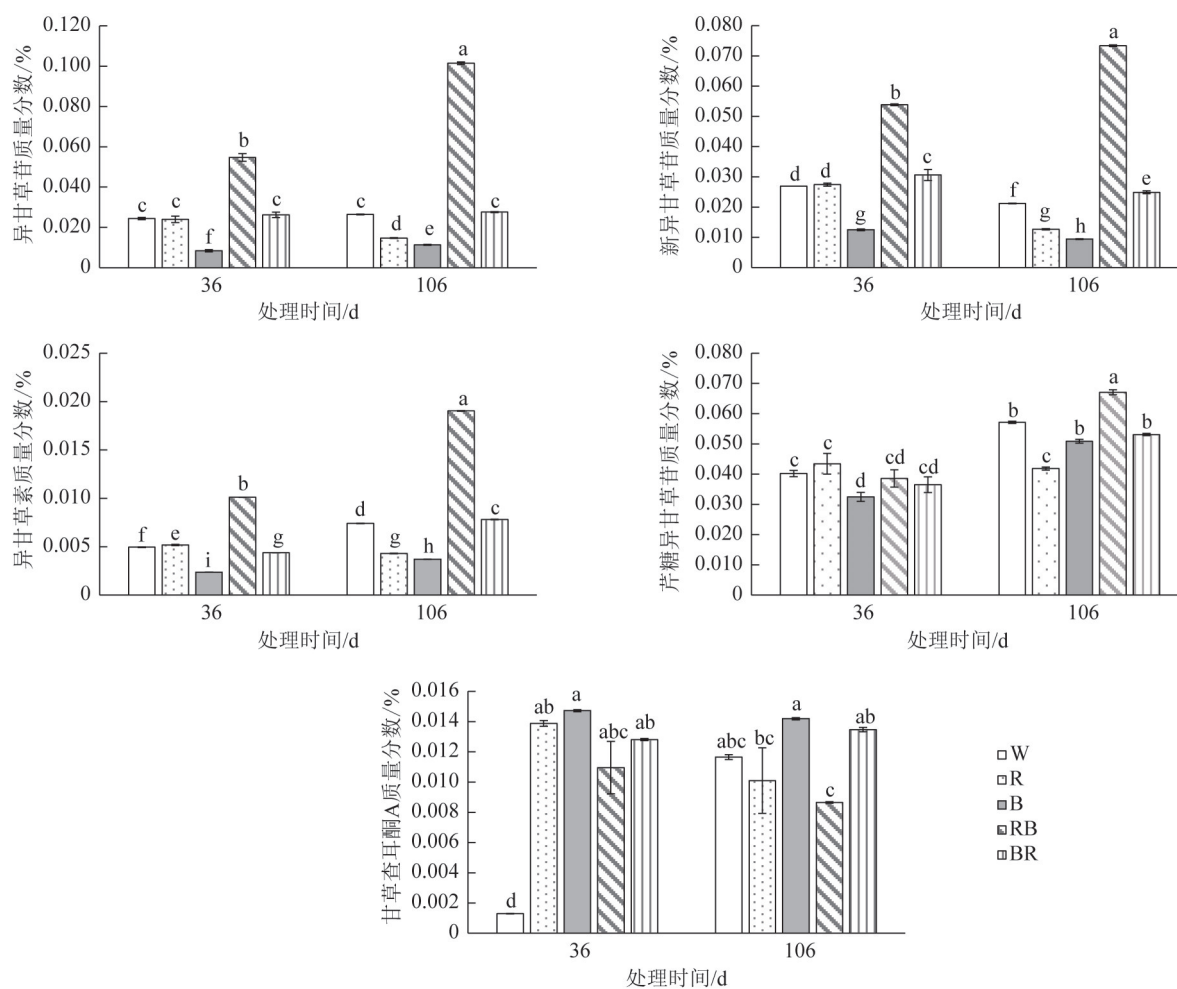
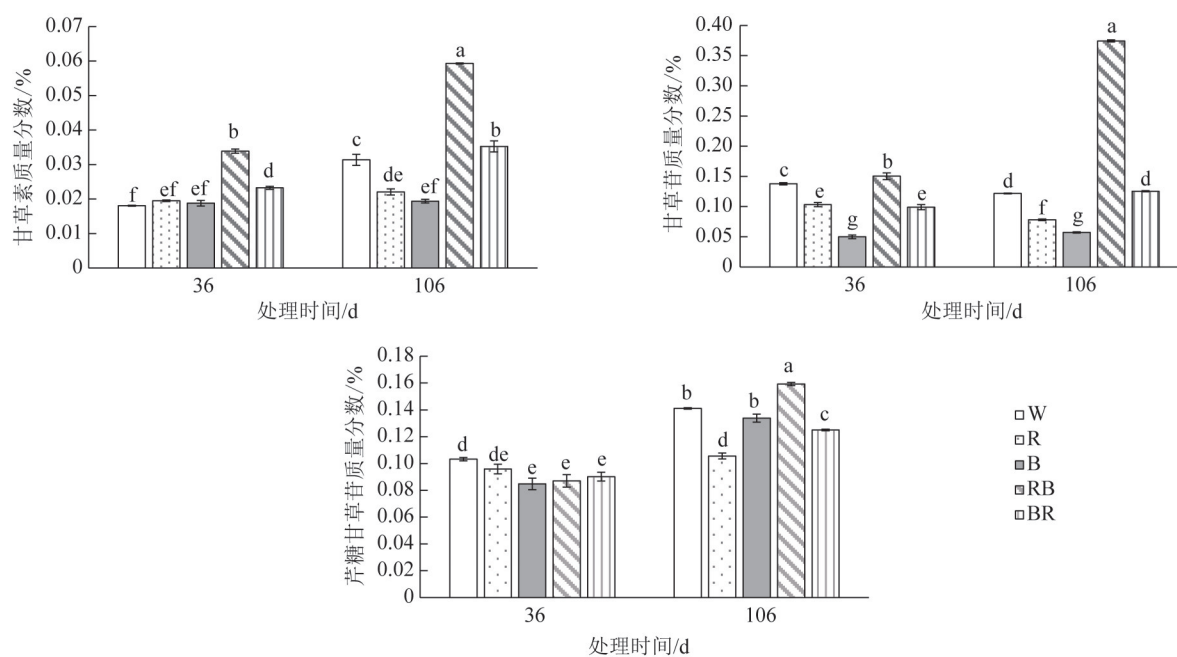


图4 不同光质下甘草中甘草酸质量分数变化($\bar{x} \pm s$, $n=4$)

黄酮类化合物生物合成途径第一阶段是合成黄酮类基本骨架前体物质对香豆酰辅酶A,第二阶段由对香豆酰辅酶A和丙二酰辅酶A在系列酶促作用下形成醌式查耳酮类、二氢黄酮类、黄酮醇类、异黄酮类等化合物^[23]。如图5所示,不同光质处理36 d各组甘草中红蓝光组的查耳酮类成分异甘草苷、新异甘草苷和异甘草素质量分数均最高,分别比对照显著高124.10%、99.92%和104.32%;不同光质处理106 d甘草中异甘草苷、新异甘草苷和异甘草素质量分数变化趋势一致,均为红蓝光>蓝红光>白光>红光>蓝光,红蓝光处理106 d甘草中以上3个成分质量分数分别比对照显著高284.31%、246.35%和156.95%,蓝红光处理106 d甘草中新异甘草苷、异甘草素质量分数分别比对照显著高17.47%、5.41%。各组甘草的蔗糖异甘草苷质量分数均较高,不同光质处理106 d各组甘草的蔗糖异甘草苷质量分数差异较大,红蓝光处理106 d甘草的蔗糖异甘草苷质量分数最多是对照的1.17倍。蓝光和蓝红光处理不同时间甘草的甘草查耳酮A质量分数均较高,分别是对照的1.22~11.42倍、1.16~9.94倍;红光和红蓝光处理106 d甘草的甘草查耳酮A质量分数均较处理36 d降低。可见,红蓝光促进甘草中查耳酮类成分异甘草苷、新异甘草苷、异甘草素和蔗糖异甘草苷积累的作用较其他光质大,增加蓝光或减少红光比例可以促进甘草中甘草查耳酮A的积累。

二氢黄酮类成分是黄酮类化合物生物合成途径中查耳酮类成分转化的下游产物,如异甘草素在Ⅱ型查耳酮异构酶(Ⅱ-CHI)催化下形成二氢黄酮类成分甘草素,甘草素在糖基转移酶作用下形成甘草苷^[24],甘草苷是甘草中主要活性成分之一。如图6所示,红蓝光处理36 d甘草的甘草素和甘草苷质量分数均最高,分别比对照显著高87.43%和9.08%;不同光质处理106 d各组甘草的甘草素和甘草苷质量分数变化趋势与异甘草素一致,均为红蓝光>蓝红光>白光>红光>蓝光,红蓝光处理106 d甘草的甘草素和甘草苷质量分数分别比对照显著高89.06%、207.40%,其次蓝红光处理106 d甘草的甘草素和甘草苷质量分数分别比对照高12.42%、3.00%。不同光质处理106 d各组甘草的蔗糖甘草苷质量分数差异较处理36 d增大,除红蓝光处理106 d甘草的蔗糖甘草苷质量分数显著比对照高12.89%,其余光质处理106 d甘草的蔗糖甘草苷质量分数均小于对照。以上结果表明,红蓝光和蓝红光均能促进甘草中黄酮生物合成途径上游查耳酮类成分异甘草素和下游二氢黄酮类成分甘草素和甘草苷的积累,且以红蓝光处理效果更显著。

二氢黄酮类成分作为黄酮类化合物生物合成过程中重要的中间产物,可以转化形成其他黄酮亚类,如黄酮醇类化合物山柰酚、异黄酮类成分等^[24]。如图7所示,红蓝光处理36、106 d甘草中异黄酮类成分刺芒柄花苷含量均最高,分别比对照显著高53.17%、185.90%,除红蓝光外,其余光质下甘草的刺芒柄花苷质量分数在处理106 d均降低。不同光质处理36 d各组甘草的异黄酮类成分刺甘草查耳酮质量分数均高于处理106 d且组间差异较大,蓝红光、红光和红蓝光处理36 d甘草的刺甘草查耳酮质量分数均显著高于对照,分别是对照的1.36、1.29、1.17倍。各组甘草的黄酮醇类成分山柰酚的变化与刺甘草查耳酮类似,不同光质处理106 d各组甘草的山柰酚质量分数均较处理36 d降低,红光、蓝光混合光或单色光处理36 d甘草的山柰酚质量分数均高于对照。可见,红蓝光对甘草中刺芒柄花苷积累的影响比其他光质大,甘草中刺甘草查耳酮和山柰酚质量分数随光质处理时间的延长均降低,红光、蓝光混合光或单色光处理36 d均能促进甘草中刺甘草查耳酮和山柰酚的积累。

图5 不同光质下甘草中查耳酮类成分质量分数变化 ($\bar{x} \pm s$, $n=4$)图6 不同光质下甘草中二氢黄酮类成分质量分数变化 ($\bar{x} \pm s$, $n=4$)

3.3 不同光质处理甘草聚类分析

聚类分析可以根据样品测定的多个指标计算样品间相似度的统计量,并将相似度较高即类间距离较短的样品聚为一类,使类内样品具有较高的同质性,类间样品具有较大的差异,可以客观地探析不同处理样品间的指标变化特征^[25-26]。以甘草中12个活性成分含量标准化后数据为变量,采用欧氏距离、平均法对各组甘草进行聚类分析。如图8所示,不同光质处理不同时间甘草聚为三大类,RB2单独聚为一大类,说明红蓝光处理106 d甘草与其他光质处理甘草差别较大,除山柰酚、刺甘草查耳酮和甘草查耳酮A的含量较低外,其余9个活性成分的含量均最高;其他光质处理106 d甘草聚为第二大类,其中W2、BR2聚为一小类,表明蓝红光处理106 d甘草与对照差别较小,两者的三萜类成分甘草酸,查耳酮类成分芹糖异甘草苷、甘草查耳酮A和异甘草素,二氢黄酮类成分甘草素、芹糖甘草苷含量均较高,R2、B2聚为一小类,两者的黄酮类成分甘草查耳酮A含量均较高;不同光质处理36 d甘草聚为第三大类,表明光质处理不同时间各组甘草的差别较大,其中W1、RB1、B1各为一类,R1、BR1聚为一小类,说明红光、蓝光混合光或单色光处理36 d甘草与对照均存在差异,RB1的三萜类成分甘草酸,查耳酮类成分异甘草苷、新异甘草苷、异甘草素,

二氢黄酮成分甘草素、甘草苷,异黄酮类成分刺芒柄花苷含量均最高,B1的查耳酮类成分甘草查耳酮A含量最高,山柰酚和刺甘草查耳酮含量较高,其余9个活性成分的含量均较其他组低;R1、BR1中查耳酮类成分甘草查耳酮A、异黄酮类成分刺甘草查耳酮和黄酮醇类成分山柰酚的含量均较高。

4 讨论

4.1 不同光质对甘草生长的影响

光是影响植物生长的主要因素之一^[27],光照是影响甘草生长的主导环境因子^[28-29],红光和蓝光是叶绿体感应的主要光质^[30]。本研究结果表明,不同光质对甘草苗期生长的影响存在差异,红光促进甘草株高的作用显著,红光处理106 d较处理36 d甘草株高的增长量是对照株高增长量的1.4倍,已有研究结果也显示红光具有促进植物生长的作用^[31]。红蓝光促进甘草根部生长和干物质积累的作用较其他光质大,不同光质下甘草根长、根粗和根干质量的增长量为红蓝光>红光>白光>蓝红光>蓝光,红蓝光处理106 d较处理36 d甘草根长和根粗的增长量最多,分别是对照根长和根粗增长量的7.3、1.4倍,且其根部生物量显著增加,是对照根干质量增长量的1.93倍。根冠比反映了植物对环境的响应策略,是光合同化产物分配到植物根部和地上部的比例^[32],

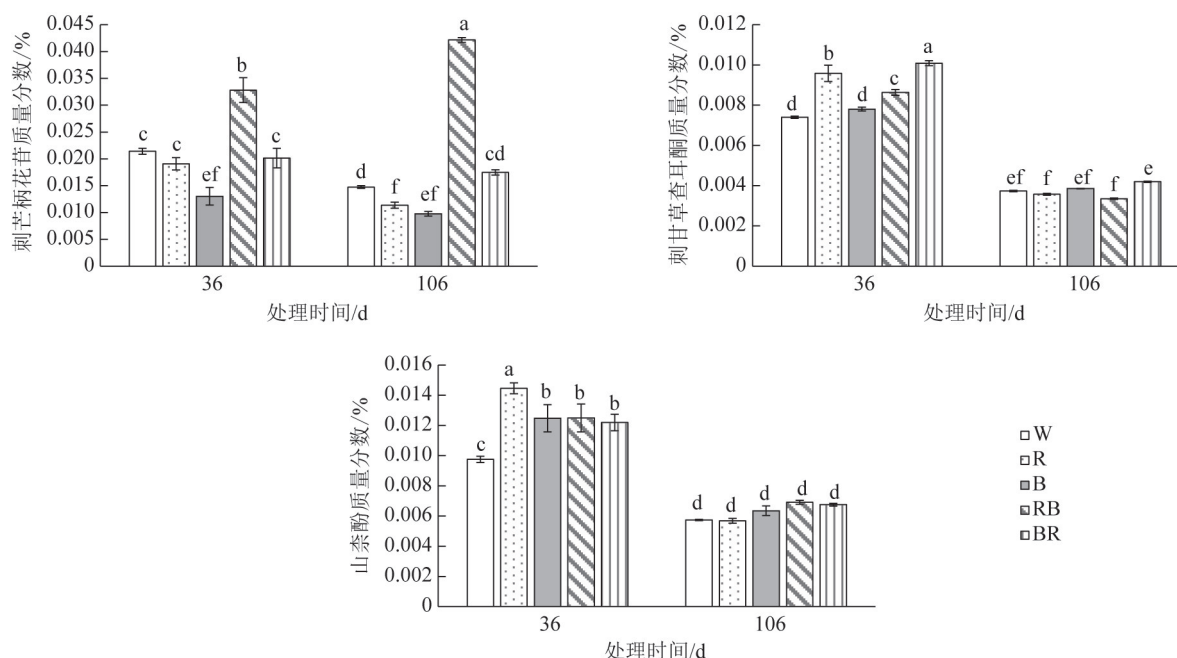
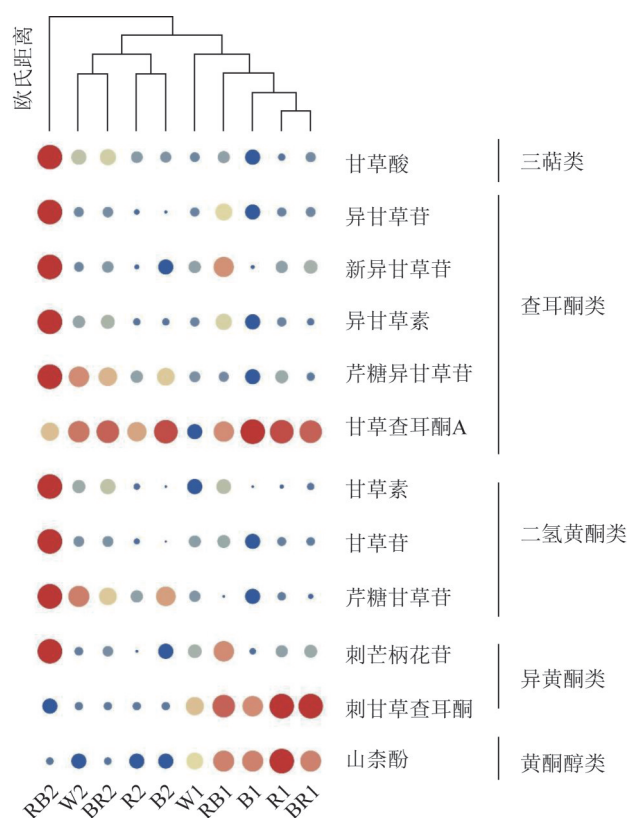


图7 不同光质下甘草中异黄酮类和黄酮醇类成分质量分数变化($\bar{x} \pm s$, $n=4$)



注：欧氏距离越短表示越相似，图中圆点颜色（蓝-黄-红）越接近红色且圆点越大表示该成分含量越高。

图8 不同光质处理不同时间甘草聚类分析

也是衡量植物体内干物质分配的指标。红蓝光处理106 d甘草的根冠比变化最大，是同生长期对照根冠比的2.81倍，说明红蓝光可以促进甘草根部干物质的分配，其原因可能是光谱中植物光系统利用效率最高的组成是红光，其次是蓝光，红蓝混合光下甘草的光能利用效率增加促进了植株生物量的积累^[33]。

4.2 不同光质对甘草活性成分积累的影响特征

甘草活性成分主要为次生代谢成分，甘草酸为三萜类化合物，经甲羟戊酸途径合成；异甘草苷、异甘草素、芹糖异甘草苷均以查耳酮为母核，甘草素、甘草苷和芹糖甘草苷均以二氢黄酮为母核，为经苯丙烷代谢途径中黄酮类化合物生物合成途径形成的黄酮类化合物^[34]。本研究结果表明，不同光质对甘草不同类型活性成分影响特征存在差别。聚类分析结果显示，光质处理不同时间甘草明显分为2类，说明随着甘草在不同光质下处理时间的延长，甘草中活性成分含量差异增大，除甘草查耳酮A、山柰酚和刺甘草查耳酮外，其余9个活性成分均表现出不同程度的积累。总体上，红蓝光促进甘草中三萜类成分

甘草酸，查耳酮类成分芹糖异甘草苷、异甘草苷、异甘草素、新异甘草苷，二氢黄酮类成分甘草苷、甘草素的积累作用较其他光质大，红蓝光对甘草中查耳酮类成分异甘草素，二氢黄酮类成分甘草素、甘草苷的促进作用显著且呈正相关，聚类分析中RB2单独聚为一类，表现为随着甘草在红蓝光下处理时间的延长，其甘草酸、芹糖异甘草苷、异甘草苷、异甘草素、新异甘草苷、甘草素和甘草苷含量分别比对照高88.24%、17.39%、284.31%、156.95%、246.35%、89.06%和207.40%，分别比处理36 d甘草中以上7个活性成分的含量高134.34%、73.86%、85.41%、88.43%、36.35%、75.03%和149.11%。其次，蓝红光促进甘草中三萜类成分甘草酸，查耳酮类成分异甘草素，二氢黄酮类成分甘草素、甘草苷积累作用较大，BR1中除甘草苷、异甘草素含量略低于W1，甘草素、甘草酸含量均比W1高28.58%、4.74%，BR2中甘草苷、甘草素、甘草酸和异甘草素含量分别比W2高12.42%、3.00%、7.07%和5.41%，说明蓝红光对甘草的甘草苷、甘草酸和异甘草素的影响作用随处理时间延长而增大。此外，增大蓝光比例可以促进甘草中查耳酮类成分甘草查耳酮A的积累；红光处理36 d甘草的黄酮类成分山柰酚、刺甘草查耳酮积累较多，处理106 d甘草中以上2个成分含量显著降低，说明红光长期处理抑制甘草中以上2个成分的积累。

植物体内不同的光受体包括光敏素、蓝光/近紫外光受体等可以感知外界光信号的改变，不同光质触发不同光受体，进而影响植物的生长发育及初生、次生代谢活动等。目前研究认为，三萜皂苷类化合物的生物合成以初生代谢产物乙酰辅酶A为起始物质，经过系列酶促反应形成各种结构的三萜皂苷，光质对三萜皂苷合成途径关键酶的影响研究发现蓝光可能与三七细胞中原人参二醇转化为原人参三醇的关键酶细胞色素P450酶的激活有一定内在关系^[14]，红蓝光处理有利于走马胎幼苗单株皂苷产量^[35]。黄酮类化合物是苯丙烷代谢途径中代谢物种类最多的分支途径，苯丙烷代谢起始的3个反应由苯丙氨酸解氨酶（PAL）、肉桂酸-4-羟化酶（C4H）和对香豆酸-辅酶A连接酶（4CL）催化，形成下游代谢途径的前体物质对香豆酰辅酶A，已有研究表明，蓝光促进苦荞芽中芦丁的积累，与黄酮合成上游基因的表达量成正比^[20]，蓝光促进黄芪根中总黄

酮、总皂苷积累作用较红光和自然光大,并能维持黄芪根中抗氧化系统平衡^[6]。可见,不同植物对光质的响应不同,光质对植物次生代谢成分的影响作用存在差异,甘草根中的次生代谢成分的生物合成途径不同,甘草中不同类别次生代谢成分在不同光质下存在差异,可能与其生物合成途径上关键酶基因受光质诱导的程度不同有关。

5 结论

光质对甘草不同部位生长的影响程度不同,红光具有促进甘草地上部生长的特性,红蓝光对甘草根部生长的影响较其他光质大,随着甘草在红蓝光处理时间的延长其根部生物量显著增加。本研究建立甘草根部多成分含量测定的方法,结合聚类分析探析不同光质处理不同时间甘草苗期活性成分变化的特征。红光和蓝光混合光质较红光或蓝光单色光质对甘草活性成分的影响作用更大,综合考虑光质对甘草生长和活性成分积累的影响,红蓝光对甘草根部生物量和多种活性成分的促进作用较其他光质大,且随着红蓝光处理时间的延长,甘草中三萜类成分甘草酸,查耳酮类成分芹糖苷甘草苷、异甘草苷、异甘草素、新异甘草苷及二氢黄酮类成分甘草苷、甘草素的含量显著增加,提示红蓝光在促进甘草根部生长和多种活性成分积累作用中具有较高的应用价值。此外,其他光质对甘草的活性成分积累具有不同程度的促进作用,可以根据实际需求选择不同光质进行调控。本研究是在控制条件下进行不同光质对甘草幼苗生长和活性成分积累的影响研究,需要进一步对光质在甘草整个生长期内的影响进行探究,同时为光质在调控甘草生长和活性成分积累的应用研究提供参考。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:88.
- [2] 包芳,李羽涵,杨志刚. 甘草代谢组学的研究进展[J]. 中草药,2018,49(19):4662-4669.
- [3] 豆康宁,王飞,罗海澜,等. 甘草及提取物在食品中的应用进展[J]. 食品研究与开发,2014,35(21):140-142.
- [4] 郑云枫,魏娟花,冷康,等. 甘草属 *Glycyrrhiza* L. 植物资源化学及利用研究进展[J]. 中国现代中药,2015,17(10):1096-1108.
- [5] 邓桃妹,彭灿,彭代银,等. 甘草化学成分和药理作用研究进展及质量标志物的探讨[J]. 中国中药杂志,2021,46(11):2660-2676.
- [6] 李娜,张晨,钟赣生,等. 不同品种甘草化学成分、药理作用的研究进展及质量标志物(Q-Marker)预测分析[J]. 中草药,2021,52(24):7680-7692.
- [7] 魏胜利,王文全,王海. 我国中西部地区甘草资源及其可持续利用的研究[J]. 中国中药杂志,2003,28(3):13-17.
- [8] 魏胜利,王文全,王继永,等. 我国不同产区野生与栽培甘草的甘草酸含量及其影响因子的初步研究[J]. 中国中药杂志,2012,37(10):1341-1345.
- [9] 杨瑞,李文东,马永生,等. 不同基原甘草的分子鉴定及市售甘草药材的质量评价[J]. 药学学报,2017,52(2):318-326.
- [10] 赵则海. 乌拉尔甘草生活史型特征及生态机理[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2004.
- [11] 尚辛亥. 甘草质量与生境的关系及其可持续发展研究[D]. 北京:北京中医药大学,2010.
- [12] 高荣孚,张鸿明. 植物光调控的研究进展[J]. 北京林业大学学报,2002,24(增1):239-247.
- [13] 蔡庆生. 植物生理学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2014:91-96.
- [14] 焦晓林,高微微. 环境因子对药用植物三萜皂苷合成影响的研究进展[J]. 中草药,2011,42(2):398-402.
- [15] 冯思念,王瑞,顾雯,等. 不同强度的红蓝光质对丹参根系形态和有效成分积累的影响[J]. 中草药,2019,50(21):5313-5318.
- [16] 胡瑜辉,杨振宇,宋诗娟,等. 不同光质对黄芪抗氧化酶活性及产量和品质的影响[J]. 山西农业科学,2021,49(10):1173-1178.
- [17] 李铂,唐志书,王楠,等. 不同LED光质对陕产重楼生理特性和成分积累的影响[J]. 中国现代中药,2019,21(10):1386-1391.
- [18] 侯俊玲,余学杰,张璐. 甘草自然分布区热能特征及其适宜性分析[J]. 北京中医药大学学报,2007,30(7):484-487.
- [19] 彭励,张琪,罗杰. 光质对甘草光合作用及有效成分积累的影响[C]//中国植物学会. 中国植物学会七十五周年年会论文摘要汇编(1933—2008). 兰州:中国植物学会,2008:403-404.
- [20] 潘俊倩,佟曦然,郭宝林. 光对植物黄酮类化合物的影响研究进展[J]. 中国中药杂志,2016,41(21):3897-3903.
- [21] 周香珍,王文全. 甘草质量差异研究概况[J]. 中国中药杂志,2011,36(10):1394-1396.
- [22] 祝天添,卢迪,曾宇馨,等. 土层深度对甘草根系呼吸代谢及甘草酸积累的影响[J]. 中药材,2019,42(8):1749-1753.
- [23] 吴沂芸,陈翠平,任超翔,等. 红花黄酮类成分积累量与功能基因表达水平的关联分析[J]. 中国中药杂志,2017,42(1):83-87.

- [24] 林春草,陈大伟,戴均贵. 黄酮类化合物合成生物学研究进展[J]. 药学学报,2022,57(5):1322-1335.
- [25] 谭艳,王国庆,陈贛,等. 基于主成分及聚类分析的不同产地芦笋品质综合评价[J]. 现代食品科技,2022,38(7):316-326.
- [26] 白云霞,宋晓玲,渠弼,等. 基于HPLC指纹图谱结合灰色关联度与聚类分析对不同产地石榴皮质量评价研究[J]. 中国药学杂志,2021,56(1):68-74.
- [27] 鲍顺淑,贺冬仙,郭顺星. 可控环境下光照时间对铁皮石斛组培苗生长发育的影响[J]. 中国农业科技导报,2007,9(6):90-94.
- [28] YU F, WANG Q, WEI S, et al. Effect of genotype and environment on five bioactive components of cultivated licorice (*Glycyrrhiza uralensis*) populations in northern China[J]. Biol Pharm Bull, 2015, 38(1): 75-81.
- [29] 曲雪洁,王晨,刘长利. 近十年甘草栽培研究进展[J]. 天津中医药大学学报,2021,40(1):5-14.
- [30] 杨俊伟. 不同比例红蓝光对番茄幼苗生长及气孔运动的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [31] 代艾林,张永刚,艾强,等. 不同光质对朝鲜淫羊藿生长、生理和黄酮类成分积累的影响[J]. 中国农业科技导报,2022,24(4):85-92.
- [32] 樊勇明,李伟,温仲明,等. 黄土区不同恢复年限草地群落生物量及根冠比对氮添加的响应[J]. 生态学报,2021,41(24):9824-9835.
- [33] 季方,甘佩典,刘男,等. LED光质和日累积光照量对番茄种苗生长及能量利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(22):231-238.
- [34] 鲁亚奇,罗寒燕,王丽霞,等. 甘草炒制过程中主要成分的含量变化及转化规律分析[J]. 中国实验方剂学杂志,2020,26(10):100-106.
- [35] 李坤,毛纯,刘军,等. LED光质对走马胎生长和生理及活性成分含量的影响[J]. 西北植物学报,2022,42(5):819-828.

(收稿日期: 2022-11-08 编辑: 戴玮)