

紫外和远红光辐照对黄芩幼苗生长及活性成分积累的影响

张楠^{1,2} 刘霄² 王圆梦² 司怀军¹ 李雪虎^{2,4} 辛志君^{2,4} 杨江伟¹ 周利斌^{2,3,4}

¹(甘肃农业大学生命科学技术学院 兰州 730070)

²(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

³(中国科学院近代物理研究所 重离子科学与技术全国重点实验室 兰州 730000)

⁴(中国科学院大学 北京 101408)

摘要 为探究光质调控在黄芩 (*Scutellaria baicalensis*) 药用品质形成中的作用机制, 本研究以黄芩幼苗为研究对象, 设置对照、紫外-B (UV-B)、远红光 (FR) 及 UV-B+FR 组合光质辐照处理, 在处理 10 d 和 30 d 后, 分别测定其生长指标、光合参数、抗氧化活性及根部黄酮类成分含量。结果表明: 处理 30 d 时, UV-B 辐照显著抑制了黄芩叶片与根系的生物量积累, 但促进了次生代谢产物的合成, 总黄酮含量较对照组提高 6.57%; FR 处理则对生物量与总黄酮积累均具有促进作用, 根干重较对照组增加 40.90%, 总黄酮含量提高 3.93%; UV-B+FR 的组合处理表现出协同效应: 一方面缓解了 UV-B 的胁迫损伤, 使根干重较 UV-B 处理提高 45.13%; 另一方面显著促进了黄酮类成分的合成, 其中黄芩苷和汉黄芩苷含量分别较对照提高 4.30% 和 13.85%。在处理 10 d 时, UV-B 和 FR 显著影响了抗氧化酶活性和叶绿素荧光参数, 而处理 30 d 后, 黄芩发生适应性恢复, 叶绿素含量升高。综上, UV-B 与 FR 组合处理可调控黄芩幼苗的生长发育, 促进药用成分积累, 本研究结果为中药材人工栽培中的光环境调控提供了理论依据。

关键词 黄芩, UV-B, 远红光 (FR), 生长, 黄酮类化合物

中图分类号 Q691

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0031

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0031

引用该文:

张楠, 刘霄, 王圆梦, 等. 紫外和远红光辐照对黄芩幼苗生长及活性成分积累的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2026, 44(4): 040401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0031.

ZHANG Nan, LIU Xiao, WANG Yuanmeng, *et al.* Effects of UV-B and far-red light irradiation on the growth and active component accumulation in *Scutellaria baicalensis* seedlings[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2026, 44(4): 040401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0031.



基金资助: 核技术研发科研项目 (HJSYF2024(31))、国家重点研发计划 (2022YFD1200705) 和内蒙古自治区自然科学基金重点项目 (2024ZD23)

第一作者: 张楠, 女, 2000年12月出生, 甘肃农业大学硕士研究生, 主要从事药用植物辐射诱变育种研究

通信作者: 杨江伟, 副教授, E-mail: yjw@gsau.edu.cn; 周利斌, 研究员, E-mail: libinzhou@impcas.ac.cn

收稿日期: 初稿 2026-02-28; 修回 2026-04-10

Supported by the Nuclear Technology R&D Program (HJSYF2024(31)), the National Key Research and Development Program of China(2022YFD1200705), and the Inner Mongolia National Science Foundation (2024ZD23)

First author: ZHANG Nan (female), born in December 2000, is a master candidate at Gansu Agricultural University whose research focuses on radiation-induced mutation breeding of medicinal plants

Corresponding author: YANG Jiangwei, associate professor, E-mail: yjw@gsau.edu.cn; ZHOU Libin, professor, E-mail: libinzhou@impcas.ac.cn

Received 28 February 2026; accepted 10 April 2026

Effects of UV-B and far-red light irradiation on the growth and active component accumulation in *Scutellaria baicalensis* seedlings

ZHANG Nan^{1,2} LIU Xiao² WANG Yuanmeng² SI Huaijun¹ LI Xuehu^{2,4}

XIN Zhijun^{2,4} YANG Jiangwei¹ ZHOU Libin^{2,3,4}

¹(College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

²(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

³(State Key Laboratory of Heavy Ion Accelerator Science and Technology, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

⁴(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

ABSTRACT To investigate the regulatory role of light quality in the medicinal quality formation of *Scutellaria baicalensis* (*S. baicalensis*), seedlings of *S. baicalensis* were subjected to four light treatments: control, ultraviolet-B (UV-B), far-red light (FR), and a combination of UV-B and FR (UV-B+FR). Growth indices, photosynthetic parameters, antioxidant activity, and flavonoid content in the roots were measured after 10 and 30 days of treatment. The results showed that after 30 days of treatment, UV-B irradiation significantly inhibited the biomass accumulation in both leaves and roots but promoted the synthesis of secondary metabolites, with total flavonoid content increased by 6.57% compared with the control. FR treatment promoted both biomass and total flavonoid accumulation, increasing root dry weight by 40.90% and raising total flavonoid content by 3.93% relative to the control. The combined UV-B+FR treatment exhibited a synergistic effect: on one hand, it alleviated UV-B-induced stress damage, increasing root dry weight by 45.13% compared with UV-B alone; on the other hand, it significantly enhanced the synthesis of flavonoids, with baicalin and wogonoside contents increasing by 4.30% and 13.85%, respectively, relative to the control. At 10 days of treatment, UV-B and FR significantly affected antioxidant enzyme activities and chlorophyll fluorescence parameters; after 30 days, *S. baicalensis* showed adaptive recovery with increased chlorophyll content. In conclusion, the combined UV-B and FR treatment regulates the growth and development of *S. baicalensis* seedlings and promotes the accumulation of medicinal components. These findings provide a theoretical basis for manipulating the light environment in the artificial cultivation of medicinal plants.

KEYWORDS *Scutellaria baicalensis*, Ultraviolet B (UV-B), Far-red light (FR), Growth, Flavonoids

CLC Q691

黄芩 (*Scutellaria baicalensis* Georgi) 是唇形科多年生药用植物，其根、茎、叶富含黄酮类化合物，具有抗炎、抗病毒、抗肿瘤及抗菌等多种生物活性，是评价其药用品质的关键指标^[1]。该植物主要分布于中国东北，西北及华中地区，其中甘肃为重要产区^[2]。随着临床用药需求的持续增长，野生黄芩资源已难以满足市场需求，人工栽培逐渐成为其主要来源^[3]。然而，人工栽培过程中，光照、温度、土壤等环境因素会影响黄芩根部黄酮类物质的积累，导致药材品质参差不齐，这一问题已成为阻碍黄芩产业规模化发展的关键难题。因此，如何在不影响或促进植株生长发育的同时提高黄酮含量以保障其药用价值，是当前黄芩研究的热点问题。

环境因子在调控植物生长发育及次生代谢过程中起着至关重要的作用^[4]。其中，光信号作为关键环境因子之一，已经成为研究热点。植物通过光受体感知太阳光谱中的不同波长，经信号通路介导相应的生理响应^[5]，其中280~320 nm的紫外线B (Ultraviolet B, UV-B) 和700~750 nm的远红光 (Far-red light, FR) 对植物生长、生理特性及代谢产物积累具有显著影响。UV-B辐照作为太阳光的固有组分，其生物学效应受辐照波长、强度和持续时间调控^[6]。研究表明，UV-B辐照可有效促进多种药用植物次生代谢产物的积累。例如，五味子植株经UV-B辐照后，木脂素和酚类物质含量呈上升趋势^[7]；当归幼苗经UV-B处理后，阿魏酸和类黄酮含量显著增加^[8]。然而，UV-B在促进

黄酮类化合物积累的同时, 往往显著抑制植株生物量积累^[9]。因此, 实现UV-B辐照下次生代谢物合成与生物量积累的同步提升, 对黄芩的高品质种植栽培至关重要。

与UV-B辐照类似, FR作为光环境的重要组成部分, 可被植物的光敏色素特异性感知, 进而调控光形态建成过程, 包括促进茎和叶柄伸长^[10]。研究发现, 光信号中FR强度增加会导致红光: 远红光比值下降, 从而诱导植物产生避荫综合征, 表现为茎秆伸长、分枝减少等^[11]。此外, FR对生物量积累也具有促进作用^[12]。例如, FR辐照可促进铁皮石斛叶面积增加和茎伸长^[13], 还可促进夏枯草的生长发育^[14]。与UV-B抑制生物量积累的效应不同, FR在促进植物生长的同时, 能够维持甚至促进生物量积累。

当前关于光质调控植物生物学过程的研究多聚焦于单一波段, 缺乏多光谱协同效应的系统研究。UV-B和FR对黄芩的调控机制尚未见系统报道, 二者协同作用对药用植物生长、光合效率及次生代谢的影响仍不明确。本研究通过设置光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)对照、单一UV-B辐照、单一FR辐照及UV-B+FR组合处理4种光环境, 对黄芩幼苗的生长表型、光合特性、抗氧化系统及黄酮类代谢物含量进行综合分析, 旨在阐明UV-B与FR单一及组合辐照对植物发育和次生代谢的调控效应, 为药用植物栽培系统中精准光环境管理提供理论依据。

1 材料及方法

1.1 材料与试剂

黄芩干种子来源于定西市农业科学研究院。于2024年8月, 筛选颗粒饱满、大小均匀的种子播种于50孔穴盘中。在温度为(26±3)℃的温室中培养4周。待种子萌发后, 选择长势一致的幼苗移栽于10 cm×10 cm×40 cm(长×宽×高)的方形育苗盆中, 每盆定植2株, 继续在温室中培养4周, 以该批幼苗作为后续实验材料。实验所用化学试剂包括: 2, 2-二氮-双(3-乙基苯并噻唑-6-磺酸)铵盐(ABTS)、1, 1-二苯基-2-苦味基肼(DPPH)、总抗氧化能力(T-AOC)检测试剂盒, 以及黄芩苷、汉黄芩苷、黄芩素和汉黄芩素四种标准品(纯度不低于98%), 以上试剂均购自北京索莱宝科技有限公司; 实验所用乙醇为分析纯乙醇, 购

自天津市富宇精细化工有限公司; 甲醇、乙腈和甲酸为色谱纯, 购自北京市迈瑞达科技有限公司。

1.2 仪器与设备

杭州虹谱光色科技有限公司的紫外光谱分析仪; 瑞士TECAN公司生产的Infinite M Nano多功能微孔板酶标仪; 巩义市予华仪器有限责任公司的DHG-9140A电热恒温鼓风干燥箱; 美国沃特世公司生产的Waters 2695高效液相色谱仪; 深华泰超声洗净设备有限公司生产的超声仪; 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司的PB-10型PH测试仪; 德国Walz公司生产的DUAL-PAM-100的叶绿素荧光仪; 长沙湘仪离心机仪器有限公司生产的TDZ5-WS型台式低速离心机。

1.3 方法

1.3.1 辐照处理

将温室内连续生长8周后的黄芩幼苗转移至光照培养间中培养, 光周期设置为光照14 h/黑暗10 h, 温度维持在(25±2)℃, 以发光二极管灯提供PAR作为对照组, 处理组在PAR光照基础上分别补充UV-B辐照(30 W UV-B灯, 峰值吸收波长: 313 nm)、FR辐照(30 W FR灯, 峰值吸收波长: 730 nm), 以及先进行6 h FR辐照后进行8 h UV-B辐照的组合处理。根据前期预实验结果确定辐照参数: UV-B辐照时间为8 h/d(15: 00 - 23: 00), FR辐照时间为6 h/d(9: 00 - 15: 00)。光照处理期间, 植株置于灯管正下方, 垂直距离为45 cm。使用紫外光谱分析仪测量UV-B辐照剂量及FR光子通量密度, UV-B剂量为115.2 kJ/(m²·d), FR光子通量密度为0.791 mol/(m²·d)。所有实验均设置3组生物学重复。

1.3.2 生长指标测定

对辐照处理10 d和30 d的黄芩幼苗进行生长指标的测定, 包括株高、茎直径、叶片数以及生物量(在下胚轴与根连接处分为地上部分和地下部分, 鲜重于取样后立即称量记录, 干重于60℃烘箱中干燥至恒重后称量)。每个处理随机选取10株植株进行测定。

1.3.3 抗氧化酶活性及丙二醛含量测定

分别于辐照处理10 d和30 d后采集黄芩幼苗叶片样品。每个处理随机选取10株幼苗, 每株取2~3片真叶, 混合组成0.1 g鲜重样品。样品经液氮

速冻后，保存于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中，用于抗氧化酶活性及丙二醛（Malondialdehyde, MDA）含量的测定。超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase, SOD）活性采用氮蓝四唑法^[15]测定、过氧化物酶（Peroxidase, POD）活性采用愈创木酚法^[15]测定、过氧化氢酶（Catalase, CAT）活性采用过氧化氢分解法^[15]测定，MDA含量采用硫代巴比妥酸显色法^[15]测定。

1.3.4 抗氧化活性指标测定

供试品溶液制备。分别于辐照处理10 d和30 d后，每个处理随机选取10株黄芩幼苗的根部，洗净后置于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中干燥48 h，用研钵研磨成粉末。精密称取各组样品粉末0.1 g，置于50 mL锥形瓶中，加入25 mL 70%乙醇，超声提取40 min。提取液以4 000 r/min离心10 min，过滤后收集滤液。滤渣重复上述提取过程一次，合并两次滤液。将合并后的滤液于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中浓缩至干燥。所得干燥粉末用70%乙醇定容至10 mL，作为供试品溶液，每组样品平行制备3份。

自由基清除率和总抗氧化能力测定。DPPH自由基清除能力的 IC_{50} 值参照Blois^[16]描述的方法进行测定，对供试品溶液进行系列梯度稀释，得到0.040 mg/mL，0.063 mg/mL，0.098 mg/mL，0.154 mg/mL，0.241 mg/mL的样品测试液，取各浓度测试液与等体积80 $\mu\text{g/mL}$ DPPH溶液混合，室温避光反应30 min后，以无水甲醇为空白对照，在517 nm波长处测定吸光度，根据式（1）计算DPPH自由基清除率；ABTS自由基清除能力的 IC_{50} 参照Re等^[17]的方法进行测定，对供试品溶液稀释为0.040 mg/mL，0.063 mg/mL，0.154 mg/mL，0.302 mg/mL，0.593 mg/mL的系列浓度，取14 mmol/L ABTS 20 mL与14.8 mmol/L过硫酸钾溶液20 mL混合，避光反应16 h，制得ABTS储备液，使用前以95%乙醇稀释至吸光度为 0.7 ± 0.02 。将ABTS工作液与各浓度测试液等体积混合，常温静置6 min，以50%乙醇为空白对照，于734 nm处测定吸光度，根据式（2）计算ABTS自由基清除率；总抗氧化能力（T-AOC）采用商业试剂盒测定：将180 μL 工作液、6 μL 样品提取物和18 μL 蒸馏水加入96孔板，充分混合后在室温下放置10 min，于593 nm处测定吸光度。通过 Fe^{2+} 标准曲线（ X ， $\mu\text{mol/mL}$ ）计算样品浓度，根据式（3）计算总抗氧化能力。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%)=[1-(A_1-A_2)/A_0]\times 100 \quad (1)$$

$$\text{ABTS 自由基清除率}(\%)=[1-(A_1-A_2)/A_0]\times 100 \quad (2)$$

$$\text{总抗氧化能力 T-AOC}(\mu\text{mol/g})=34\times X/W \quad (3)$$

式中： A_1 为样品与DPPH（或ABTS）反应后的吸光度； A_2 表示不含DPPH（或ABTS）的样品本底吸光度； A_0 表示不含样品的空白吸光度； X 为样品浓度， $\mu\text{mol/mL}$ ； W 是样品质量，g。

1.3.5 光合色素含量测定

分别对辐照处理10 d和30 d的黄芩幼苗进行取样，每组处理随机选择10株，剪取近顶端第2~3对真叶，混合取样0.1 g。采用乙醇浸提法提取叶绿素^[18]，具体步骤：将叶片组织浸入10 mL 95%无水乙醇中，于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中暗处理48 h，直至叶片完全发白。随后，使用酶标仪（Tecan Infinite 200）测定665 nm、649 nm和470 nm波长下的吸光度。根据式（4~9）分别计算叶绿素a（Chlorophyll a, Chl a）、叶绿素b（Chlorophyll b, Chl b）、总叶绿素（Total Chlorophyll, Total Chl）和类胡萝卜素（Carotenoids, Car）含量以及叶绿素a/b比值。

$$C_{\text{Chl a}}(\text{mg/L})=13.95\times A_{665}-6.88\times A_{649} \quad (4)$$

$$C_{\text{Chl b}}(\text{mg/L})=24.96\times A_{649}-7.32\times A_{665} \quad (5)$$

$$\text{Total Chl}=\text{Chl a}+\text{Chl b} \quad (6)$$

$$C_{\text{Car}}=(1\ 000\times A_{470}-2.05\times C_{\text{Chl a}}-114.8\times C_{\text{Chl b}})/245 \quad (7)$$

$$\text{Chl a/b}=\text{Chl a}/\text{Chl b} \quad (8)$$

$$\text{叶绿素含量}=(\text{色素浓度}\times\text{提取液体积})/\text{样品鲜重}\times 1\ 000 \quad (9)$$

式中： A_{665} 、 A_{649} 和 A_{470} 分别代表特定波长下叶绿素浸提液的吸光值。

1.3.6 叶绿素荧光参数测定

分别于辐照处理10 d和30 d后，于晴朗天气9:00–11:00进行叶绿素荧光参数测定。测试前对黄芩幼苗进行暗适应20 min，使用叶绿素荧光仪对每组处理随机选取6株长势一致的植株，选取植株基部向上第6~7片真叶进行测量，测定最大光化学效率（Maximum efficiency of PSII photochemistry, F_v/F_m ）、实际光能转化效率（Actual quantum yield of PSII photochemistry, Y (II)）、光化学淬灭系数（Photochemical quenching

coefficient, qP) 和非光化学淬灭系数 (Non-photochemical quenching coefficient, NPQ)。

1.3.7 黄酮类化合物含量测定

色谱条件。采用 Waters Xbridge C18 色谱柱 (4.6 mm×250 mm, 5 μ m) 进行分离分析。流动相由 0.1% 甲酸水溶液 (A) 和乙腈 (B) 组成, 采用梯度洗脱程序 (0~5 min, 32%~35% B; 5~30 min, 35%~50% B), 流速 1.0 mL/min; 检测波长 275 nm; 柱温 27 $^{\circ}$ C; 进样量 10 μ L。

对照组溶液制备。精密称取黄芩苷 16.5 mg、汉黄芩苷 4.4 mg、黄芩素 3.9 mg、汉黄芩素 1.8 mg, 置于 10 mL 容量瓶中, 加甲醇溶解并定容至刻度, 摇匀, 制得混合对照品储备液。

供试品溶液制备。取 §1.3.4 的待测量溶液 1.5 mL, 用 0.22 μ m 微孔滤膜过滤, 滤液即为供试品溶液。

标准曲线绘制。分别精密量取对照品溶液 0.2 mL、0.4 mL、0.8 mL、1.2 mL、1.6 mL, 置于 2 mL 容量瓶中, 加入甲醇稀释至刻度线, 摇匀后经 0.22 μ m 微孔滤膜过滤。分别吸取上述浓度的溶液各 10 μ L, 按照 §1.3.7 色谱条件进行测定^[19]。以峰面积积分值 (Y) 对其质量浓度 (X , mg/mL) 进行线性回归, 根据式 (10)~(13) 得到黄芩苷、汉黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素的回归方程。

$$Y=2.964\times10^7 X+3.395\times10^6, R^2=0.995\ 0 \quad (10)$$

$$Y=3.760\times10^7 X+3.325\times10^5, R^2=0.994\ 3 \quad (11)$$

$$Y=5.515\times10^7 X-8.456\times10^3, R^2=0.995\ 0 \quad (12)$$

$$Y=4.562\times10^7 X+1.231\times10^5, R^2=0.994\ 8 \quad (13)$$

表明黄芩苷在 0.165~1.320 mg/mL, 汉黄芩苷在 0.044~0.352 mg/mL, 黄芩素在 0.039~0.312 mg/mL, 汉黄芩素在 0.018~0.144 mg/mL 的检测浓度范围内线性关系良好。

1.3.8 总黄酮含量测定

精密称取干燥的黄芩苷对照品 4.32 mg, 置于 100 mL 容量瓶中, 加入无水乙醇溶解并定容至刻度线, 摇匀, 制得黄芩苷储备液。精密吸取该储备溶液 1.0 mL、1.2 mL、1.4 mL、1.6 mL、1.8 mL、2.0 mL, 分别置于 10 mL 容量瓶中, 加无水乙醇定容至刻度线, 摇匀, 得到系列浓度的黄芩苷标准溶液。以无水乙醇为空白对照, 在 278 nm 波长处测定各标准溶液的吸光度^[20]。以吸光度 (Y) 为纵坐标, 黄芩苷浓度 (X , mg/mL) 为横坐标, 绘制标准曲线, 得到线性回归方程为

$Y=39.744 X+0.057\ 6$, $R^2=0.996\ 8$ 。在相同条件下, 取 1.3.4 节方法制备的供试品溶液, 于 278 nm 波长处测定其吸光度, 并根据标准曲线计算样品中总黄酮含量。

1.4 数据处理

以上每个处理组均设置 3 组生物学重复, 即同时进行 3 份平行材料的辐照实验, 结果以平均值 $\pm$ 标准差 (mean $\pm$ SD) 表示。使用 Excel 2020 软件进行数据处理, 使用 SPSS 25.0 软件的单因素方差分析检验差异显著性, 相关图表由 Origin 2021 软件绘制。

2 结果

2.1 UV-B 和 FR 对黄芩幼苗生长的影响

如图 1(a) 所示, 辐照处理 10 d 后, UV-B 辐照组的株高较对照组显著降低, 而 FR 辐照组则较对照组显著增加 16.84%, UV-B+FR 组合处理组株高与对照组无显著差异。辐照处理 30 d 后, FR 辐照组株高与对照组无显著差异, 其余各处理组株高均显著低于对照。在整个处理期间, UV-B 辐照下的幼苗株高始终低于对照, 表明 UV-B 对植株生长具有明显的抑制作用。在处理 10 d 时, FR 显著促进了株高的增长, 且 UV-B+FR 组合处理使株高恢复至对照水平, 表明补充 FR 光可缓解 UV-B 对生长的抑制效应。不同光质处理对茎直径也产生影响。如图 1(b) 所示, 处理 10 d 时, UV-B+FR 组合处理使茎直径较对照增加了 6.12%。处理 30 d 时, FR 辐照组茎直径较对照提高 3.29%, 而 UV-B+FR 组合处理组与对照无显著差异, 表明 FR 辐照对茎的增粗生长具有积极作用。如图 1(c) 所示, 在处理 10 d 和 30 d 时, UV-B 辐照组的叶片数均显著低于对照, 表明 UV-B 辐照抑制了叶片发育。FR 辐照组和 UV-B+FR 组合处理组的叶片数与对照均无显著差异, 表明持续辐照下 FR 光对叶片数的影响较小。如图 1(d) 和图 1(e) 所示, 在整个辐照期间, UV-B 辐照组的地上部分和根部鲜重均受到显著抑制, 而其他处理组与对照均无显著差异。这表明 UV-B 辐照显著抑制了黄芩的鲜重积累, 而 UV-B+FR 组合处理可使鲜重恢复至对照水平, 表明 FR 处理能够缓解 UV-B 对黄芩生物量的抑制作用。根干重结果如图 1(f) 所示。处理 10 d 时, UV-B、FR 及 UV-B+FR 组合处理组的根干重均显著低于对照,

表现出明显的抑制作用。处理30 d时，UV-B辐照组根干重已恢复至对照水平，而FR辐照组和UV-B+FR组合处理组的根干重则较对照分别显著增加

了40.90%和26.67%。这表明单独UV-B处理对根干重积累的抑制效应随处理时间延长而减弱，长期FR辐照则显著促进黄芩幼苗干物质的积累。

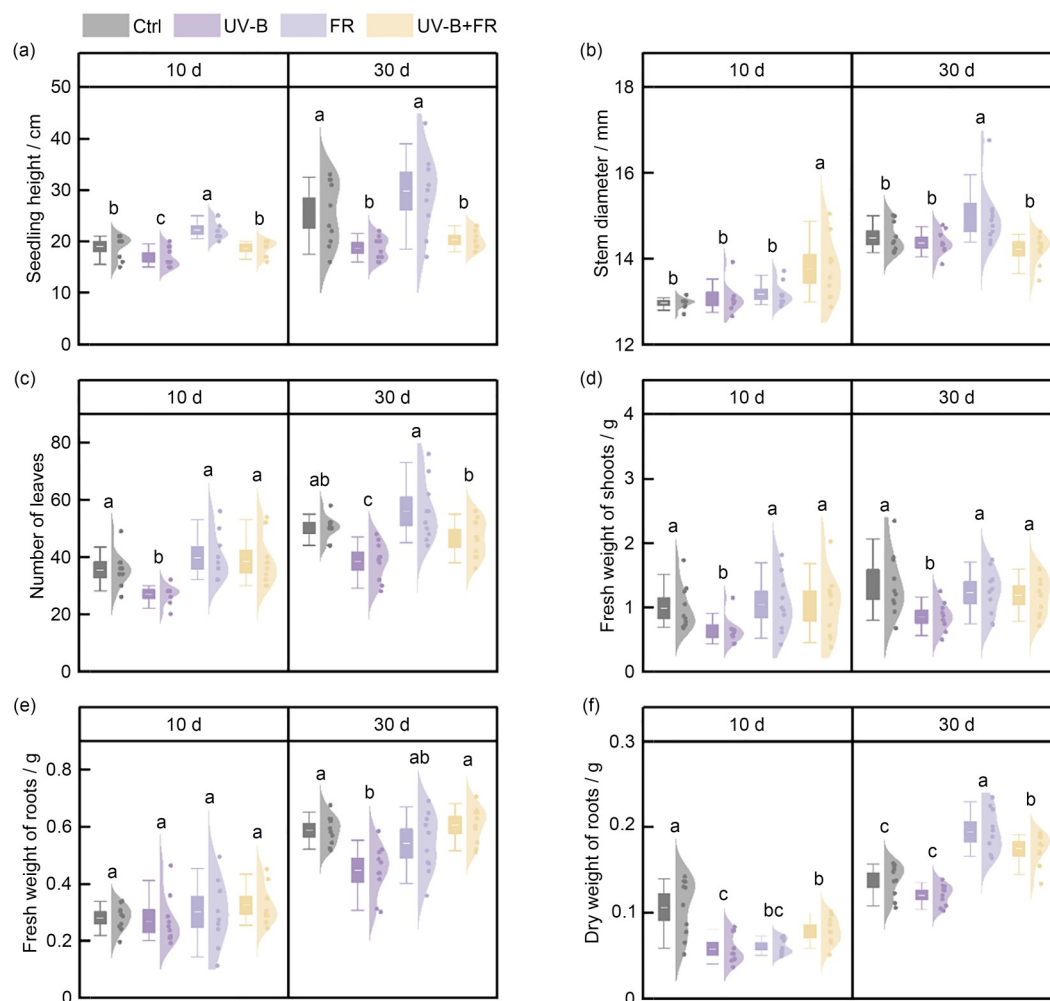


图1 UV-B和FR处理对黄芩幼苗生长的影响(彩色见网络版):(a)株高;(b)茎直径;(c)叶片数;(d)地上部分鲜重;(e)根鲜重;(f)根干重;不同小写字母表示处理间差异具有统计学意义($p < 0.05$)

Fig.1 Effects of UV-B and FR treatments on the growth of *S. baicalensis* seedlings (color online): (a) seedling height; (b) stem diameter; (c) number of leaves; (d) fresh weight of shoots; (e) fresh weight of roots; (f) dry weight of roots; different lowercase letters indicate statistically significant differences among treatments ($p < 0.05$)

2.2 UV-B和FR对黄芩幼苗抗氧化酶活性和MDA的影响

如图2(a)~(c)所示，辐照10 d时，UV-B、FR和UV-B+FR组合处理的SOD活性、POD活性以及CAT活性均显著高于对照组；辐照30 d时，UV-B+FR组合处理的SOD活性和CAT活性较对照组相比显著提高，其余处理组与对照组相比无显著差异。随着辐照时间的延长，各处理组的POD活性均显著下降，其中UV-B组较对照组降低了57.81%。

MDA是活性氧(Reactive oxygen species, ROS)诱导细胞膜等产生的脂质过氧化产物，其含

量可反映细胞质膜通透性及氧化损伤程度^[21]。辐照处理10 d时，UV-B+FR组合处理的MDA含量较对照组提高了42.11%；辐照30 d时，UV-B组和UV-B+FR组合处理较对照组含量均有所提高，分别提高了19.13%和20.10% (图2(d))。这些结果表明，不同光质处理对黄芩幼苗的抗氧化酶活性和膜脂过氧化程度具有显著影响，其中UV-B辐照引起的膜脂过氧化损伤更为明显，而UV-B+FR组合处理可显著激活抗氧化酶系统，表明FR可能通过激活抗氧化酶活性，在一定程度上缓解UV-B辐照诱导的氧化损伤。

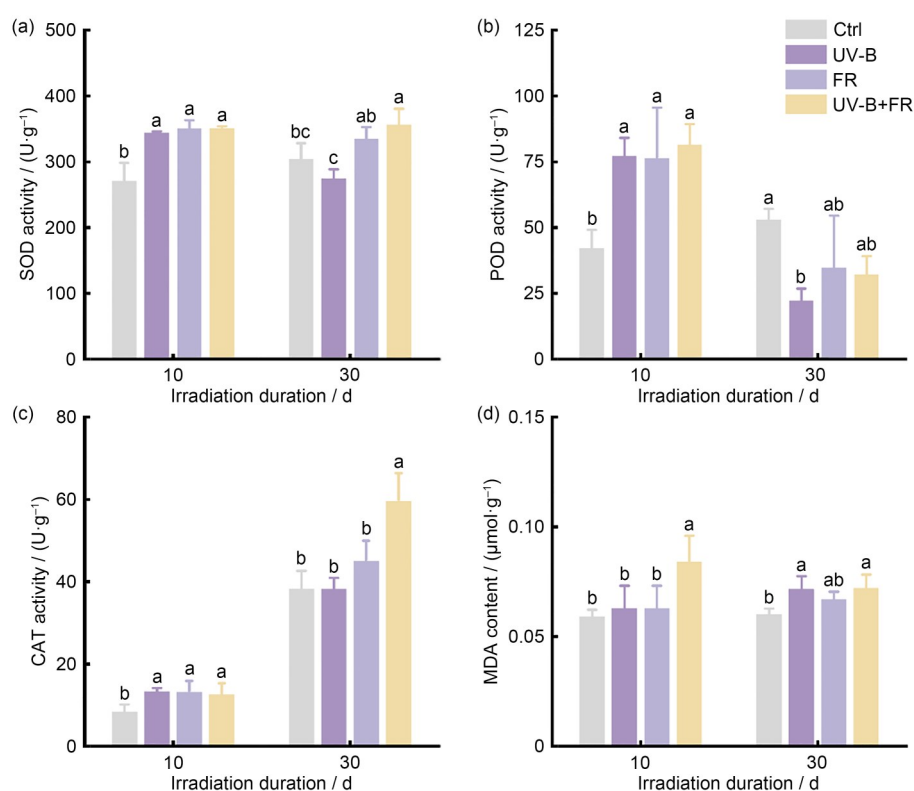


图2 UV-B和FR辐照对黄芩幼苗抗氧化酶活性和MDA含量的影响(彩色见网络版):(a)SOD活性;(b)POD活性;(c)CAT活性;(d)MDA含量;不同小写字母表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$)

Fig.2 Effects of UV-B and FR irradiation on antioxidant enzyme activities and MDA content in *S. baicalensis* seedlings (color online): (a) SOD activity; (b) POD activity; (c) CAT activity; (d) MDA content; different lowercase letters indicate statistically significant differences between treatments ($p < 0.05$)

2.3 UV-B和FR对黄芩幼苗抗氧化活性的影响

如图3所示,经辐照处理10 d后,与对照组相比,UV-B、FR单独及UV-B+FR组合处理均显著提高了黄芩幼苗的DPPH自由基清除 IC_{50} 值,表明其清除DPPH自由基的能力在短时间内受到抑制;然而,各处理组对ABTS自由基清除 IC_{50} 值均无显

著差异。此外,FR单独处理及其与UV-B的组合处理显著降低了幼苗的总抗氧化能力。辐照处理至30 d时,不同辐照处理对DPPH自由基清除 IC_{50} 值无显著影响。但FR单独辐照显著降低了ABTS自由基清除 IC_{50} 值,说明其对ABTS自由基的清除能力增强。同时,UV-B+FR组合处理显著提升了幼苗的总抗氧化能力。

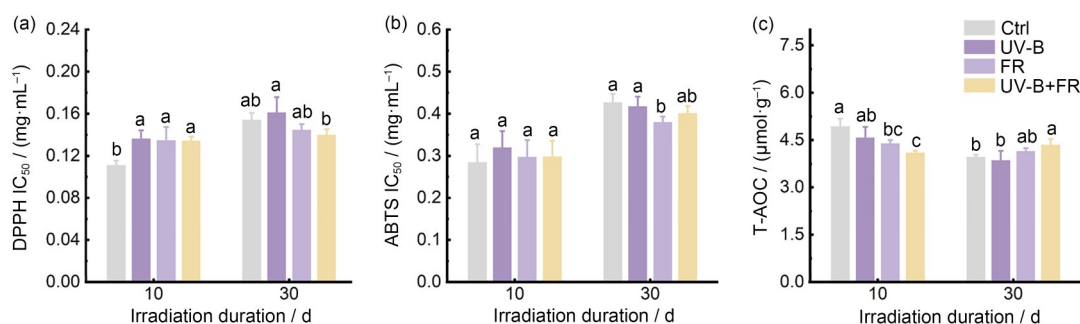


图3 UV-B和FR辐照对黄芩幼苗抗氧化能力的影响(彩色见网络版):(a)DPPH自由基清除能力;(b)ABTS自由基清除能力;(c)总抗氧化能力(T-AOC);不同小写字母表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$)

Fig.3 Effects of UV-B and FR irradiation on the antioxidant capacity of *S. baicalensis* seedlings (color online): (a) DPPH radical scavenging capacity; (b) ABTS radical scavenging capacity; (c) total antioxidant capacity (T-AOC); different lowercase letters indicate statistically significant differences between treatments ($p < 0.05$)

2.4 UV-B和FR对黄芩幼苗光合作用的影响

2.4.1 UV-B和FR对黄芩幼苗光合色素含量的影响

为进一步探究不同光质辐照对黄芩幼苗光合作用的影响,测定了不同辐照时间下叶片的叶绿素含量。结果如图4(a)所示,辐照处理10 d时,三种光质处理组的Chl a、Chl b及Total Chl含量均显著低于对照组,其中UV-B组、FR组和UV-B+FR组合处理组的Total Chl含量分别降低了27.42%、28.03%和23.91%。辐照处理30 d时,UV-B辐照组的Chl a、Chl b及Total Chl含量均显著高于对照组,而FR辐照组及UV-B+FR组合处理组与对照组相比无显著差异(图4(c))。这表明黄芩幼苗在辐照初期受不同光质的影响较大,但随着处理时间的延长,光合色素含量逐渐恢复至正常水平。

Car是反映植物光合作用和光保护能力的重要指标^[22],其含量变化呈现明显的阶段性特征。如图4(a)所示,辐照处理10 d时,UV-B组、FR组及UV-B+FR组合处理组的Car含量较对照组分别下降47.55%、44.52%和39.36%。辐照处理30 d时,UV-B辐照组的Car含量较对照组显著提高了15.45%(图4(c)),表明黄芩幼苗在辐照初期受到明显的光质胁迫,但随着辐照时间的延长和植株生长,逐渐表现出适应性和恢复能力。

Chl a/b是反映植物光合结构和功能的重要指标。如图4(b)、(d)所示,FR辐照组和UV-B+FR组合处理组的Chl a/b比值与对照组相比变化较小,而UV-B辐照组在处理10 d时较对照组显著降低9.86%,但随着辐照时间的延长逐渐恢复至正常水平。这一变化趋势进一步证实了UV-B辐照对黄芩光合作用的抑制效应,同时也揭示了植物内在的适应性恢复潜力。

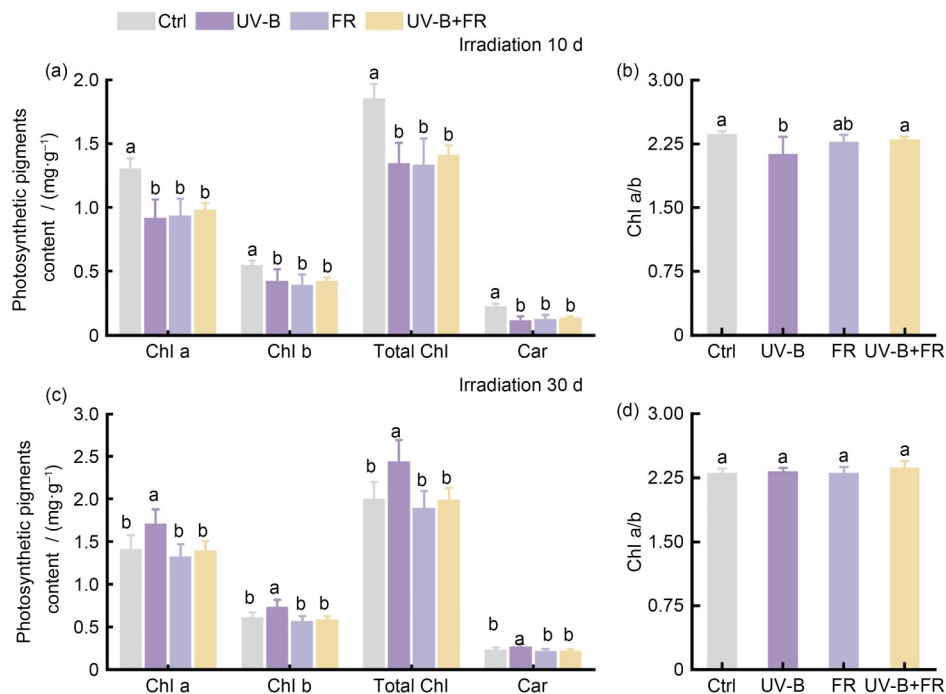


图4 UV-B和FR辐照对黄芩幼苗叶绿素、类胡萝卜素含量及Chl a/b比值的影响(彩色见网络版): (a)辐照10 d光合色素含量;(b)辐照10 d Chl a/b比值;(c)辐照30 d光合色素含量;(d)辐照30 d Chl a/b比值;不同小写字母表示各处理间存在统计学意义($p < 0.05$)

Fig.4 Effects of UV-B and FR irradiation on chlorophyll, carotenoid contents and Chl a/b ratio in *S. baicalensis* seedlings (color online): (a) photosynthetic pigments content after 10 days of irradiation; (b) Chl a/b ratio after 10 days of irradiation; (c) photosynthetic pigments content after 30 days of irradiation; (d) Chl a/b ratio after 30 days of irradiation; different lowercase letters indicate statistically significant differences between treatments ($p < 0.05$)

2.4.2 UV-B和FR对黄芩幼苗叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光参数作为连接植物光合作用与环

境因子的内在指标,能够有效反映植物的光合生理状态及其作用机制的动态关联^[23-24]。实验数据表明,不同辐照处理对叶绿素荧光参数产生了显著

影响。如图5(a)所示,辐照处理10 d时,各处理组的 F_v/F_m 与对照组相比无显著差异。辐照处理30 d时,所有处理组的 F_v/F_m 值均较对照组显著提高。这表明植物对UV-B和FR辐照的响应是一个动态过程,随着处理时间延长,植株能通过适应性机制逐步恢复光合功能。补充FR辐照及其与UV-B的组合处理组在整个辐照期间均有助于维持更高且更稳定的光化学效率。

如图5(b)所示,辐照处理30 d后,各处理间PSII实际光量子产量 $Y(II)$ 的差异更为明显。UV-B辐照组较对照组降低了28.43%,而FR辐照组和

UV-B+FR组合处理组保持相对稳定。 qP 的变化如图5(c)所示,辐照处理10 d时,UV-B辐照组和UV-B+FR组合处理组较对照组相比下降;辐照处理30 d时,FR组和UV-B+FR组合处理组较对照组分别增加35.87%和38.03%。 NPQ 如图5(d)所示,在整个观测周期内,对照组与各处理组的 NPQ 值均保持相对稳定。这些结果表明,不同光质处理对黄芩幼苗的光合作用具有不同的调控效应,其中UV-B+FR的组合处理表现出较好的光保护效应,可有效缓解UV-B辐照引起的光化学效率下降。

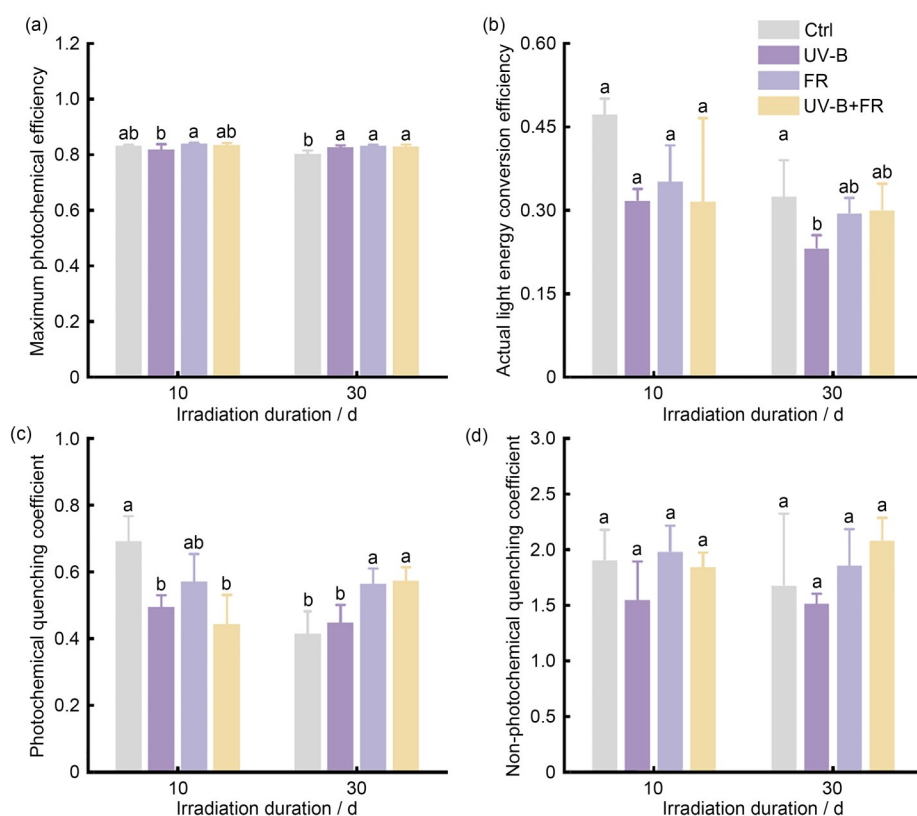


图5 UV-B和FR辐照对黄芩幼苗叶绿素荧光的影响(彩色见网络版):(a)最大光化学效率(F_v/F_m);(b)实际光能转换效率($Y(II)$);(c)光化学淬灭系数(qP);(d)非光化学淬灭系数(NPQ);不同小写字母表示各处理间存在统计学意义($p<0.05$)

Fig.5 Effects of UV-B and FR irradiation on chlorophyll fluorescence parameters in *S. baicalensis* seedlings (color online): (a) maximum photochemical efficiency (F_v/F_m); (b) actual light energy conversion efficiency ($Y(II)$); (c) photochemical quenching coefficient (qP); (d) non-photochemical quenching coefficient (NPQ); different lowercase letters indicate statistically significant differences between treatments ($p<0.05$)

2.5 UV-B和FR对黄芩幼苗黄酮含量的影响

2.5.1 UV-B和FR对黄芩幼苗黄酮类化合物含量的影响

不同光质对黄芩根部黄酮类化合物成分的积累具有显著影响。在相同的色谱条件下,样品与混合对照品溶液的各目标色谱峰均实现了良好分离(图6、7)。辐照处理10 d时,各处理组的黄酮

类成分表现出不同的变化趋势:如图8(a)所示,黄芩苷含量在UV-B辐照组和FR辐照组中与对照组无显著差异,而UV-B+FR组合处理组较对照组减少了6.53%。如图8(b)所示,汉黄芩苷含量在各处理组中均显著下降,UV-B辐照组、FR辐照组和UV-B+FR组合处理组分别降低了17.63%、13.83%和26.69%。如图8(c)所示,黄芩素含量

在UV-B和FR辐照下与对照组相比无显著差异，但在UV-B+FR组合处理下较对照组提高了25.02%。如图8(d)所示，汉黄芩素含量在UV-B辐照组和FR辐照组分别较对照组降低12.56%和3.97%，而UV-B+FR组合处理较对照组增加了12.29%。

随着辐照时间延长至30 d，黄酮类化合物的积累呈现新的变化趋势。如图8(a)所示，黄芩苷含量在UV-B辐照组和UV-B+FR组合辐照下分别较对照组增加了5.53%和4.30%，而FR辐照组与对照组无显著差异。如图8(b)所示，汉黄芩苷含量在UV-B辐照组和FR辐照组分别较对照组增加了6.87%和5.96%；UV-B+FR组合辐照的效果更为显著，较对照组增加了13.85%，表明UV-B+FR

组合辐照能够有效促进汉黄芩苷的积累。黄芩素(图8(c))和汉黄芩素(图8(d))含量在各处理组中与对照组相比基本保持稳定。

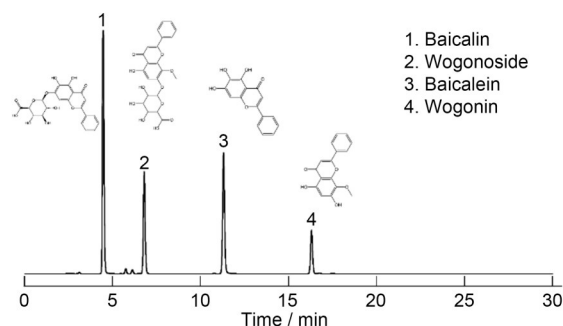


图6 对照品四种黄酮类化合物的高效液相色谱图
Fig.6 HPLC chromatogram of four kinds of flavonoids reference standards

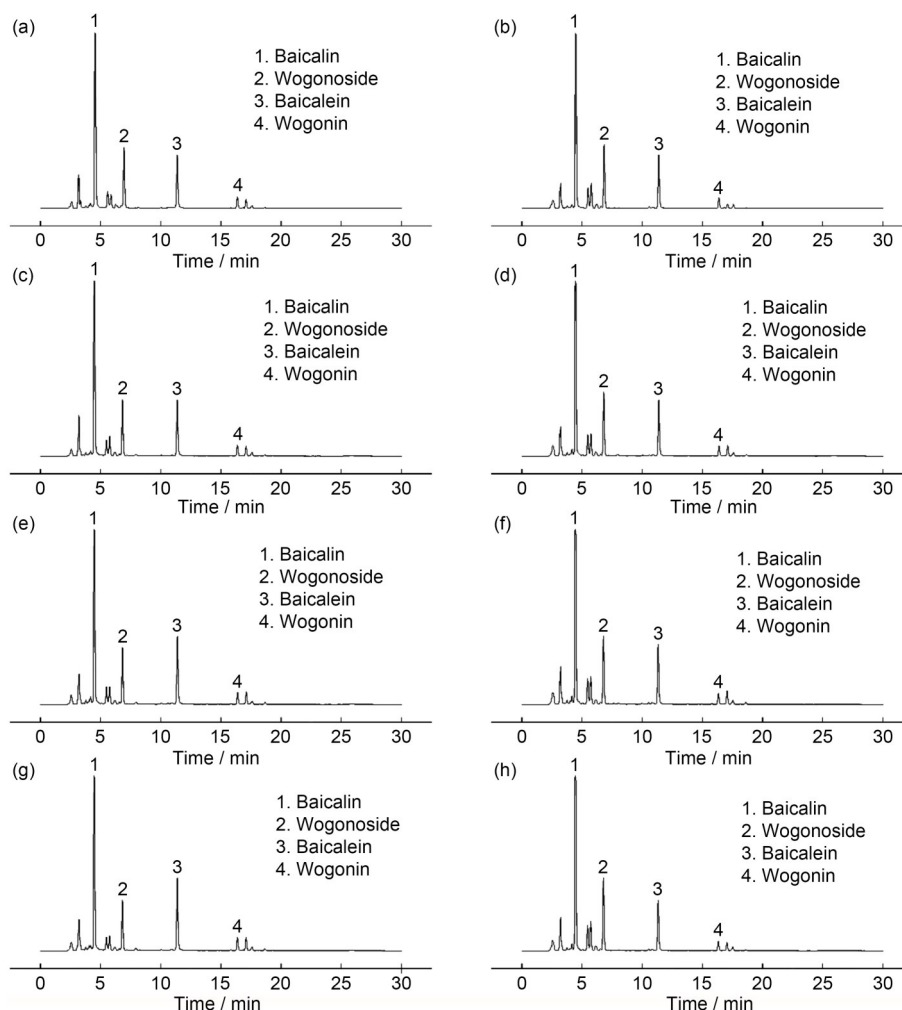


图7 不同光质辐照后4种黄酮类化合物的高效液相色谱图：

辐照10 d: (a)Ctrl, (c)UV-B, (e)FR, (g)UV-B+FR; 辐照30 d: (b)Ctrl, (d)UV-B, (f)FR, (h)UV-B+FR
Fig.7 HPLC chromatogram of four kinds of flavonoids under different light quality irradiations: (a) Ctrl, (c) UV-B, (e) FR, (g) UV-B+FR at 10 days of irradiation; (b) Ctrl, (d) UV-B, (f) FR, (h) UV-B+FR at 30 days of irradiation

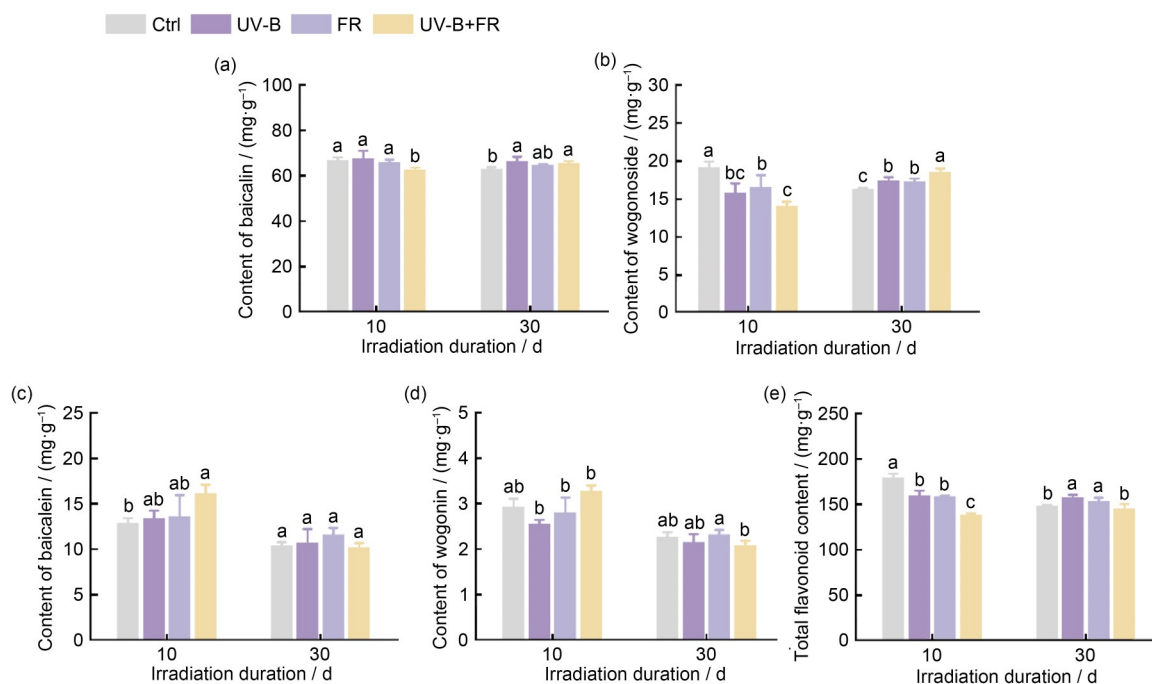


图8 UV-B和FR辐照对黄芩总黄酮和黄酮类化合物含量的影响(彩色见网络版):(a)黄芩苷;(b)汉黄芩苷;(c)黄芩素;(d)汉黄芩素;(e)总黄酮含量;不同小写字母表示各处理间存在统计学意义($p < 0.05$)

Fig.8 Effects of UV-B and FR irradiation on the contents of total flavonoids and flavonoid compounds in *S. baicalensis* (color online): (a) baicalin; (b) wogonoside; (c) baicalein; (d) wogonin; (e) total flavonoid content; different lowercase letters indicate statistically significant differences between treatments ($p < 0.05$)

2.5.2 UV-B和FR对黄芩幼苗总黄酮含量的影响

不同光质辐照对黄芩根部总黄酮含量的影响呈现时间依赖性动态变化。如图8(e)所示,辐照处理10 d时,UV-B辐照组和FR辐照组的根部总黄酮含量较对照组有所降低,其中UV-B+FR组合处理组的降幅最为显著,较对照组减少22.61%。随着辐照时间延长至30 d,各处理组的总黄酮含量呈现恢复趋势,其中UV-B辐照组和FR辐照组较对照组分别显著增加6.57%和3.93%,而UV-B+FR组合处理组则恢复至对照组水平。这表明光质处理对黄芩总黄酮积累的影响具有时间依赖性,随着辐照时间的增加,UV-B和FR可能通过激活植物次生代谢途径促进黄酮的生物合成。

3 讨论

不同光质对黄芩幼苗生长发育及次生代谢物含量的影响呈现出复杂的光质互作效应,其作用机制可能涉及光受体、光信号转导及植物激素等多维度调控^[25]。本研究发现,UV-B辐照显著抑制黄芩幼苗的根干重、鲜重、株高及叶片数,这与先前报道的UV-B对天竺葵^[26]和甘草^[27]生长的抑制效应一致,表明UV-B对植物生长具有普遍的抑

制作用,FR辐照显著促进了黄芩幼苗的株高、茎直径及生物量积累,该促进效应随时间延长而增强,该结果与水稻^[28]和生菜^[29]中的研究报道相符。FR对干物质积累的影响呈现动态变化:辐照处理10 d时表现为抑制效应,随处理时间延长逐渐恢复并转向促进作用,这一现象与羽衣甘蓝的响应模式相似^[30]。上述结果揭示了FR对植物生长的正向调控具有时效性,同时也表明UV-B与FR存在复杂的互作效应。本实验中,在UV-B+FR组合处理下,FR显著减缓了UV-B辐照对黄芩幼苗生长的抑制作用:UV-B+FR组合处理组的株高、叶片数、鲜重与对照组无显著差异。这可能源于UV-B对FR诱导的避荫反应信号通路的干扰,或光受体信号通路间的拮抗平衡。已有研究证实,光敏色素和UVR8分别是植物感知FR和UV-B的核心光受体,二者通过协同调控机制共同调节植物生长发育^[31]。当植物较短时间内先后接受FR和UV-B辐照后,尽管FR诱导的避荫反应被激活,但随后UV-B会显著抑制叶柄伸长和叶片扩展^[32]。这种拮抗作用可能是导致组合处理组生长参数与对照组无显著差异的重要原因。

研究表明,不同光条件下生长响应的变化与抗氧化防御系统的激活以及通过光介导信号通路

对光合性能的调控密切相关。在抗氧化防御层面,UV-B可能通过影响光系统功能、改变电子传递效率或重新分配防御资源,增强植物组织对后续光敏氧化作用的敏感性^[33],而FR则可能通过增强抗氧化基因表达从而缓解氧化损伤,这一结果与UV-B辐照当归^[8]和FR辐照番茄^[34]的研究报道相似。本研究发现,UV-B和FR处理10 d时均显著诱导SOD、POD和CAT活性上调,表明植物在感知到光胁迫信号后,可能通过特定的信号转导通路(如UVR8)激活活性氧清除机制,从而保护光合机构免受进一步的氧化损伤。辐照30 d后,酶活性逐渐恢复至对照水平,表明植物通过动态调整维持了氧化还原稳态。这种“先激活,后稳定”的模式反映了植物应对逆境胁迫时常见的适应性抗氧化策略。DPPH与ABTS自由基清除分析可用于评估黄芩的体外自由基清除能力,两者结果的差异可反映其抗氧化成分在作用机制与反应特异性上的不同^[35]。本研究发现,辐照10 d后,不同光质处理组的DPPH与ABTS自由基清除能力的变化并不同步,说明短期光胁迫可能选择性影响依赖于特定自由基清除途径的抗氧化物质。随着处理时间延长至30 d,FR单独处理显著增强了ABTS清除能力,且UV-B+FR组合提升了总抗氧化能力,表明长期辐照可能诱导了抗氧化系统的重建与适应,显著促进了能够有效中和ABTS⁺•的抗氧化成分积累。这一动态变化过程可能与黄酮类成分的积累模式及氧化还原稳态的恢复有关^[36],进一步支持了UV-B+FR组合在缓解光胁迫、提升黄芩抗氧化品质方面的应用潜力。

UV-B和FR对光合色素的调控同样表现出时间依赖性特征:辐照10 d时叶绿素和类胡萝卜素含量下降,但30 d后逐渐恢复,该现象与UV-B辐照南非醉茄^[37]和穿心莲^[38]导致光保护机制的研究报道一致。FR虽短期抑制叶绿素合成,但通过促进叶片扩展和生物量积累提升光子捕获效率,进而优化光合产物积累,这与生菜^[39]中研究结果相似。PSII功能分析显示,UV-B显著降低Y(II)和qP值,表明其对光化学能量转换效率具有抑制作用,这与UV-B辐照处理蓝莓^[40]的研究结果一致;而FR则维持较高的 F_v/F_m ,表明其能缓解UV-B对光合系统的损伤。此外,UV-B对qP的抑制效应强于FR,而NPQ基本保持不变,表明黄芩幼苗主要通过调节光化学反应而非热耗散来适应光胁迫。综上所述,UV-B可能通过降低光化学效率或干扰

电子传递诱发氧化胁迫,FR则通过增强光能利用效率减少电子泄漏,同时上调抗氧化酶活性,表明其可能通过协调调控光系统功能和抗氧化能力来调节UV-B介导的信号转导。二者的光质互作机制为药用植物设施栽培中光环境优化提供了理论依据。

黄芩药材的质量评价以总黄酮含量为核心指标,其中黄芩苷、汉黄芩苷等黄酮类化合物作为主要活性成分,其积累水平直接反映药材品质。本研究结果与UV-B调控穿心莲^[41]黄酮合成的规律一致:短期辐照降低含量,而延长辐照时间后含量可恢复并超过对照水平。UV-B辐照胁迫初期,植物表现出明显的资源分配策略转变,即优先将能量和资源分配给抗氧化防御系统的激活,从而导致次生代谢产物合成及生长发育所需的资源分配相对减少,这可能是部分次生代谢成分含量出现暂时性下降的主要原因^[42]。随着UV-B辐照的持续作用,植物可通过激活特定的信号转导通路,上调苯丙烷代谢途径关键酶基因的表达,并显著促进黄酮类化合物等次生代谢产物的合成^[43];另一方面通过改变内源激素水平调控次生代谢相关基因的表达模式,进而影响次生代谢产物的合成和积累^[44]。不同黄酮类化合物对光质的响应呈现显著差异。就黄芩苷而言,单一光质处理均能促进其积累,且在两种光质的组合处理下表现出协同增效作用。汉黄芩苷的积累则表现出明显的时间依赖性:10 d辐照产生抑制效应,而30 d辐照时组合处理显著促进其含量增加。处理10 d时,UV-B辐照和FR辐照均使黄芩素和汉黄芩素的积累有所增加。上述结果与UV-B诱导杜仲总酚^[45]及五味子木脂素^[7]积累的研究相一致。UV-B与FR对黄芩幼苗黄酮类活性成分积累的调控,是光信号传导与碳代谢重编程协同作用的结果。UV-B可能通过激活UVR8光受体及其下游信号通路,诱导关键传导因子如HY5基因的表达,从而上调苯丙烷途径基因的转录水平,促进黄酮类物质合成^[46-47];而FR通过phyA介导的信号途径调控PIFs等转录因子,影响光合产物向次生代谢途径的分配^[48]。在处理10 d时,植物优先启动抗氧化防御系统,碳流主要分配至基础代谢与ROS清除过程,从而抑制黄酮类成分的积累;而在处理30 d时,随着氧化还原平衡的恢复及光合能力提升,碳骨架供应增加,苯丙烷代谢途径被持续激活,最终促进黄酮类物质的积累。不同黄酮化合物对光质

响应的差异,可能与其分支代谢途径中关键酶的表达调控特异性有关。例如,黄芩苷的持续积累可能与UDP-葡萄糖转移酶活性的增强有关;而汉黄芩苷含量在辐照后期发生变化,则可能与前体物质的积累相关^[49]。上述结果表明,UV-B与FR不仅调控黄酮类成分的总量,还通过影响代谢通量分配,实现对不同黄酮化合物的差异化调控。本研究填补了FR调控植物次生代谢产物合成机制研究的空白,揭示了不同光质及其组合对黄芩幼苗黄酮类化合物积累的调控具有成分特异性和时间动态性,为深入解析光质调控黄酮类化合物合成的机制及黄芩栽培中光质干预策略的开发提供了理论依据。

综合生长、生理与代谢指标分析,UV-B与FR对黄芩幼苗的调控并非独立作用,而是通过“光信号—光合性能—氧化还原稳态—次生代谢”这一连续调控网络实现的。UV-B辐照首先抑制PSII光化学效率(表现为Y(II)和qP下降),导致电子传递受阻并诱导ROS积累,进而激活SOD、POD和CAT等抗氧化酶活性;同时,光合能力下降限制了碳同化效率,减少了向次生代谢途径供应的碳骨架,这解释了短期内生长抑制和黄酮积累受抑的原因。FR则通过提高 F_v/F_m 和促进叶片扩展,增强光能捕获能力,部分恢复光系统功能并降低电子泄漏,从源头减少ROS产生。在UV-B+FR组合处理中,UVR8与phyA信号可能存在拮抗与协同并存的调控关系:一方面,UV-B可抑制FR诱导的避荫反应(如茎伸长),表现为生长层面的拮抗效应;另一方面,FR通过改善光合性能与抗氧化能力,为UV-B诱导的次生代谢提供能量与碳骨架支持,从而在代谢层面表现为协同效应。最终,FR通过调节光系统功能与氧化还原状态,减缓UV-B对生长的抑制,使黄芩在“生长—防御”之间达到新的动态平衡。这一机制解释了组合处理下生长指标接近对照水平,而抗氧化能力和黄酮类成分积累显著提升的原因。本研究从光信号感知、能量转化及代谢调控三个层面,揭示了UV-B与FR通过多信号调控黄芩幼苗生长与次生代谢的机制,为药用植物光环境调控提供了理论框架。未来发展将重点关注以下方向:(1)参数精细化:在现有固定参数基础上,系统探究不同UV-B与FR的辐照强度、光周期及处理时长,建立可诱导目标化合物最优积累的光配方;(2)系统适配性:该光质组合调控策略适用于全人工光植物工厂、

多层育苗架及配备精准补光系统的温室等受控环境,在这些场景中,可精确复现并优化本研究所确立的光条件,从而完全避免大田生产中自然环境不可控、不稳定的问题;(3)全生育期观测:研究主要聚焦于黄芩幼苗期的短期响应,而药用品质的形成是一个贯穿全生育期的动态积累过程。未来需将观测周期延长至黄芩的整个生长周期,系统研究不同光质处理对植株发育进程及药用成分最终产量的影响,明确光质调控效应在生育期内的累积与演变规律,为建立基于全生育期光环境优化的高品质黄芩生产技术体系提供科学依据。

4 结论

本研究表明,UV-B和FR辐照对黄芩幼苗的生长、生理特性及次生代谢产物积累具有显著的时间依赖性调控效应。FR表现出双重调控作用,在促进植株生长和生物量积累的同时,有效刺激了次生代谢产物的合成;UV-B辐照虽能促进黄酮类化合物的积累,但显著抑制了植株生物量的形成,而UV-B+FR的组合处理通过光信号介导的机制,不仅缓解了UV-B辐照引起的生长抑制,还协同提高了黄酮类化合物含量。本研究结果为深入理解光质调控黄芩生长发育和代谢过程提供了新的见解,也为药用植物栽培中光环境的调控补充了理论依据,同时也拓展了光信号调控药用植物代谢网络复杂性的认知。

作者贡献声明 张楠负责实验操作、实验数据处理分析、初稿撰写;刘霄提供研究思路,负责实验指导和文章修改;王圆梦提供研究思路;李雪虎和辛志君负责实验指导;司怀军和杨江伟负责文章修改;周利斌负责实验方案设计、稿件修改,并为本研究提供经费支持。所有作者均已阅读并同意该稿最终版的所有内容。

参考文献

- 李伟,贾志春,徐伟,等.黄芩的化学成分、药理作用以及临床应用[J].山西大同大学学报(自然科学版),2024,40(5): 85-90. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0874.2024.05.014.
- LI Wei, JIA Zhichun, XU Wei, et al. Chemical composition, pharmacological action and clinical application of *Scutellaria baicalensis*[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition),

- 2024, **40**(5): 85-90. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0874.2024.05.014.
- 2 张金霞, 孙向阳, 李爱堂, 等. 不同产地甘肃黄芩有效成分对比研究[J]. 耕作与栽培, 2024, **44**(5): 120-123. DOI: 10.13605/j.cnki.52-1065/s.2024.05.021.
- ZHANG Jinxia, SUN Xiangyang, LI Aitang, *et al.* Comparative study on effective components of *Scutellaria rehdiana* Diels from different places[J]. Tillage and Cultivation, 2024, **44**(5): 120-123. DOI: 10.13605/j.cnki.52-1065/s.2024.05.021.
- 3 刘亚南, 施群, 吴卫. 黄芩种质资源及栽培技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2024(9): 73-79. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2024.09.019.
- LIU Yanan, SHI Qun, WU Wei. Research progress on germplasm resources and cultivation techniques of *Scutellaria baicalensis*[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(9): 73-79. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5739.2024.09.019.
- 4 刘霄, 张楠, 杜艳, 等. UV-B 辐射药用植物的生物学效应及其潜在应用[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, **43**(2): 020101. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0080.
- LIU Xiao, ZHANG Nan, DU Yan, *et al.* Biological effects and potential applications of UV-B radiation on medicinal plants[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, **43**(2): 020101. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0080.
- 5 Yadav A, Singh D, Lingwan M, *et al.* Light signaling and UV-B-mediated plant growth regulation[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2020, **62**(9): 1270-1292. DOI: 10.1111/jipb.12932.
- 6 任慧, 黄焱. 紫外光B波段光信号调控植物生长发育的研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, **60**(2): 327-338. DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202010003.
- REN Hui, HUANG Xi. Research progress in the regulation of plant growth and development by ultraviolet-B light[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, **60**(2): 327-338. DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202010003.
- 7 Ri I, Pak S, Pak U, *et al.* How does UV-B radiation influence the photosynthesis and secondary metabolism of *Schisandra chinensis* leaves?[J]. Industrial Crops and Products, 2024, **208**: 117832. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117832.
- 8 Peng T, Wang Y Q, Yang T, *et al.* Physiological and biochemical responses, and comparative transcriptome profiling of two *Angelica sinensis* cultivars under enhanced ultraviolet-B radiation[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, **12**: 805407. DOI: 10.3389/fpls.2021.805407.
- 9 Liu S, Gu X Y, Jiang Y B, *et al.* UV-B promotes flavonoid biosynthesis in *Ginkgo biloba* by inducing the *GbHY5-GbMYB1-GbFLS* module[J]. Horticulture Research, 2023, **10**(8): uhad118. DOI: 10.1093/hr/uhad118.
- 10 Jeong S J, Zhang Q W, Niu G H, *et al.* Synergistic enhancement of biomass allocation from leaves to stem by far-red light and warm temperature can lead to growth reductions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2024, **228**: 106024. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2024.106024.
- 11 Wang X Y, Gao X Q, Liu Y L, *et al.* Progress of research on the regulatory pathway of the plant shade-avoidance syndrome[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, **11**: 439. DOI: 10.3389/fpls.2020.00439.
- 12 Legendre R, van Iersel M W. Supplemental far-red light stimulates lettuce growth: disentangling morphological and physiological effects[J]. Plants, 2021, **10**(1): 166. DOI: 10.3390/plants10010166.
- 13 Li H S, Ye W, Wang Y Q, *et al.* RNA sequencing-based exploration of the effects of far-red light on lncRNAs involved in the shade-avoidance response of *D. officinale* [J]. PeerJ, 2021, **9**: e10769. DOI: 10.7717/peerj.10769.
- 14 Chen C L, Yang J P, Huang W D, *et al.* The effect of far-red light and nutrient level on the growth and secondary metabolites of the *in vitro* culture of *Prunella vulgaris*[J]. Agronomy, 2023, **13**(9): 2250. DOI: 10.3390/agronomy13092250.
- 15 Saber H, El-Sheekh M M, Ibrahim A, *et al.* Effect of UV-B radiation on amino acids profile, antioxidant enzymes and lipid peroxidation of some cyanobacteria and green algae[J]. International Journal of Radiation Biology, 2020, **96**(9): 1192-1206. DOI: 10.1080/09553002.2020.1793025.
- 16 Blois M S. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical[J]. Nature, 1958, **181**(4617): 1199-1200. DOI: 10.1038/1811199a0.
- 17 Re R, Pellegrini N, Proteggente A, *et al.* Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay[J]. Free Radical Biology and Medicine, 1999, **26**(9/10): 1231-1237. DOI: 10.1016/S0891-5849(98)00315-3.
- 18 Tanan T, Nascimento M, Leite R, *et al.*

- Spectrophotometric determinations of chloroplastidic pigments in *Physalis angulata* L. leaves using different methodologies[J]. Journal of Agricultural Science, 2017, **9**(11): 117.
- 19 葛灵辉, 王圆梦, 刘霄, 等. 高能碳离子束辐射黄芩幼苗的生物学效应[J]. 原子核物理评论, 2023, **40**(4): 607-618. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022120.
GE Linghui, WANG Yuanmeng, LIU Xiao, *et al.* Biological effects of high-energy carbon ion beam irradiation on seedlings of *Scutellaria baicalensis*[J]. Nuclear Physics Review, 2023, **40**(4): 607-618. DOI: 10.11804/NuclPhysRev.40.2022120.
 - 20 李云鹏, 黄芸, 魏春娥, 等. 紫外分光光度法测定黄芩中总黄酮含量[J]. 河北中医学报, 2007, **22**(1): 36-37. DOI: 10.16370/j.cnki.13-1214/r.2007.01.018.
LI Yunpeng, HUANG Yun, WEI Chune, *et al.* Determination of total flavonoids in *Scutellaria baicalensis* Georgi by ultraviolet spectrophotometry[J]. Journal of Hebei Traditional Chinese Medicine and Pharmacology, 2007, **22**(1): 36-37. DOI: 10.16370/j.cnki.13-1214/r.2007.01.018.
 - 21 Liu S F, Zhang F, Feng H J, *et al.* StTCTP positively regulates StSN2 to enhance drought stress tolerance in potato by scavenging reactive oxygen species[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, **26**(6): 2796. DOI: 10.3390/ijms26062796.
 - 22 Nguyen T N P, Sung J. Light spectral-ranged specific metabolisms of plant pigments[J]. Metabolites, 2025, **15**(1): 1. DOI: 10.3390/metabo15010001.
 - 23 金祎婷, 刘文辉, 刘凯强, 等. 全生育期干旱胁迫对‘青燕1号’燕麦叶绿素荧光参数的影响[J]. 草业学报, 2022, **31**(6): 112-126. DOI: 10.11686/cyxb2021154.
JIN Yiting, LIU Wenhui, LIU Kaiqiang, *et al.* Effect of water deficit stress on the chlorophyll fluorescence parameters of *Avena sativa* ‘Qingyan No. 1’ over the whole crop growth period[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, **31**(6): 112-126. DOI: 10.11686/cyxb2021154.
 - 24 王曼, 刘霄, 杜艳, 等. 重离子辐照育种对西蓝花幼苗生长及生理特性的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, **42**(1): 010402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0079.
WANG Man, LIU Xiao, DU Yan, *et al.* Effects of heavy ion mutation induction breeding on growth and physiological characteristics of *broccoli*[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, **42**(1): 010402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0079.
 - 25 Pashkovskiy P, Vereshchagin M, Kartashov A, *et al.* Influence of additional white, red and far-red light on growth, secondary metabolites and expression of hormone signaling genes in Scots pine under sunlight[J]. Cells, 2024, **13**(2): 194. DOI: 10.3390/cells13020194.
 - 26 Jadidi M, Mumivand H, Nia A E, *et al.* UV-A and UV-B combined with photosynthetically active radiation change plant growth, antioxidant capacity and essential oil composition of *Pelargonium graveolens*[J]. BMC Plant Biology, 2023, **23**(1): 555. DOI: 10.1186/s12870-023-04556-6.
 - 27 卡迪尔·阿布都热西提, 刘晓, 任坚毅, 等. 盐生植物胀果甘草和光果甘草对UV-B以及盐胁迫的不同响应[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, **37**: 2527-2536. DOI: 10.13417/j.gab.037.002527.
ABDULRASHID Kadir, LIU Xiao, REN Jianyi, *et al.* Different responses of halophytes plants *Glycyrrhiza inflata* Bat. and *Glycyrrhiza glabra* L. to UV-B radiation and salt stress[J]. Genomics and Applied Biology, 2018, **37**: 2527-2536. DOI: 10.13417/j.gab.037.002527.
 - 28 胡晨帆, 刘硕硕, 刘靖喆, 等. 远红光阶段辐照对水稻幼苗生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程, 2024, **14**(4): 53-60. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.04.009.
HU Chenfan, LIU Shuoshuo, LIU Jingzhe, *et al.* Influence of far-red light stage irradiation on growth and water use efficiency of rice seedlings[J]. Agricultural Engineering, 2024, **14**(4): 53-60. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.04.009.
 - 29 Li Q, Kubota C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, **67**(1): 59-64. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2009.06.011.
 - 30 Li Y M, Jiang H Z, Gao M F, *et al.* Far-red-light-induced morphology changes, phytohormone, and transcriptome reprogramming of Chinese kale (*Brassica alboglabra* Bailey)[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, **24**(6): 5563. DOI: 10.3390/ijms24065563.
 - 31 Zhang S C, Zhang L, Zou H Y, *et al.* Effects of light on secondary metabolite biosynthesis in medicinal plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, **12**: 781236. DOI: 10.3389/fpls.2021.781236.
 - 32 Hayes S, Velanis C N, Jenkins G I, *et al.* UV-B detected by the UVR8 photoreceptor antagonizes auxin signaling and plant shade avoidance[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, **111**(32): 11894-11899.

- 33 Heath R L, Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1968, **125**(1): 189-198. DOI: 10.1016/0003-9861(68)90654-1.
- 34 Wang Y L, Bian Z H, Pan T H, *et al.* Improvement of tomato salt tolerance by the regulation of photosynthetic performance and antioxidant enzyme capacity under a low red to far-red light ratio[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, **167**: 806-815. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.09.008.
- 35 He Y T, Zhang Y Z, Su N, *et al.* *Lactobacillus plantarum* ferment of *Forsythia suspensa* mitigates UVB-induced photoaging in HaCaT keratinocytes by modulating the metabolite profile and enhancing anti-photoaging activities[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2025, **12** (1): 132. DOI: 10.1186/s40643-025-00964-8.
- 36 Gagliano J, Grombone-Guaratini M T, Furlan C M. Antioxidant potential and HPLC-DAD profile of phenolic compounds from leaves and culms of *Merostachys pluriflora*[J]. South African Journal of Botany, 2018, **115**: 24-30. DOI: 10.1016/j.sajb.2017.12.008.
- 37 Takshak S, Agrawal S B. Exogenous application of IAA alleviates effects of supplemental ultraviolet-B radiation in the medicinal plant *Withania somnifera* Dunal[J]. Plant Biology, 2017, **19**(6): 904-916. DOI: 10.1111/plb.12601.
- 38 Dwivedi K, Kumar K, Kumar G. Outcome of UV-B exposure and induction of some chlorophyll phenodeviants in two important hepatoprotective ethnomedicinal wild plants[J]. Vegetos, 2021, **34**(3): 700-708. DOI: 10.1007/s42535-021-00214-0.
- 39 Zhen S Y, Bugbee B. Substituting far-red for traditionally defined photosynthetic photons results in equal canopy quantum yield for CO₂ fixation and increased photon capture during long-term studies: implications for re-defining PAR[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, **11**: 581156. DOI: 10.3389/fpls.2020.581156.
- 40 Inostroza-Blancheteau C, Acevedo P, Loyola R, *et al.* Short-term UV-B radiation affects photosynthetic performance and antioxidant gene expression in highbush blueberry leaves[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, **107**: 301-309. DOI: 10.1016/j.plaphy.2016.06.019.
- 41 Qu S C, Zeng L J, Yu S Q Y, *et al.* Effects of changeable ambient UV-B irradiation on the accumulation of diterpene lactones and flavonoids in *Andrographis paniculata* (Burm. f.) nees[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2023, **70**(4): 87. DOI: 10.1134/S1021443722602919.
- 42 Jansen M A K, Hectors K, O' Brien N M, *et al.* Plant stress and human health: Do human consumers benefit from UV-B acclimated crops? [J]. Plant Science, 2008, **175**(4): 449-458. DOI: 10.1016/j.plantsci.2008.04.010.
- 43 Hideg É, Jansen M A K, Strid Å. UV-B exposure, ROS, and stress: inseparable companions or loosely linked associates?[J]. Trends in Plant Science, 2013, **18**(2): 107-115. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.09.003.
- 44 Demkura P V, Ballaré C L. UVR8 mediates UV-B-induced Arabidopsis defense responses against *Botrytis cinerea* by controlling sinapate accumulation[J]. Molecular Plant, 2012, **5**(3): 642-652. DOI: 10.1093/mp/sss025.
- 45 Feng X P, Wang D M, Li D W. Morphological, physiological and transcriptional analyses provide insights into the biosynthesis of phenolics in *Juniperus rigida* under UV-B treatment[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2025, **220**: 109534. DOI: 10.1016/j.plaphy.2025.109534.
- 46 Santin M, Simoni S, Vangelisti A, *et al.* Transcriptomic analysis on the peel of UV-B-exposed peach fruit reveals an upregulation of phenolic- and UVR8-related pathways [J]. Plants, 2023, **12**(9): 1818. DOI: 10.3390/plants12091818.
- 47 Podolec R, Demarsy E, Ulm R. Perception and signaling of ultraviolet-B radiation in plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2021, **72**: 793-822. DOI: 10.1146/annurev-arplant-050718-095946.
- 48 何亚洲, 陈晓峰. 光质对园艺作物光合效率与次生代谢物合成的调控机理研究[J]. 江西农业学报, 2025, **37**(9): 39-45. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2025.09.007.
HE Yazhou, CHEN Xiaofeng. Study on the regulatory mechanism of light quality on photosynthetic efficiency and secondary metabolite synthesis in horticultural crops [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2025, **37**(9): 39-45. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2025.09.007.
- 49 Pei T L, Yan M X, Li T, *et al.* Characterization of UDP-glycosyltransferase family members reveals how major flavonoid glycoside accumulates in the roots of *Scutellaria baicalensis*[J]. BMC Genomics, 2022, **23**(1): 169. DOI: 10.1186/s12864-022-08391-1.