



王骏,蒋健,赵亮,等.4 种光源辐照对烟叶颜色及关键化学成分的影响[J].轻工学报,2025,40(5):72-81.
WANG J,JIANG J,ZHAO L,et al.Effects of four types of light sources irradiation on the color and key chemical composition of tobacco leaves[J].Journal of Light Industry,2025,40(5):72-81.
DOI:10.12187/2025.05.009

4 种光源辐照对烟叶颜色及关键化学成分的影响

王骏¹,蒋健¹,赵亮¹,徐建¹,胡安福¹,金一骁¹,丁宁¹,蔡铭²

1. 浙江中烟工业有限责任公司,浙江 杭州 310000;
2. 浙江工业大学 食品科学与工程学院,浙江 杭州 310000

摘要:为优化烟叶晾晒光调控技术,采用紫外光、红外光、红光和白光 4 种光源,对上、中、下 3 个部位烟叶晾晒过程的新鲜期、变黄期、变褐期及干筋期的颜色、多酚类物质、挥发性成分等关键指标进行对比分析,探究不同光源辐照对烟叶颜色及关键化学成分的影响。结果表明:经白光处理后,中部烟叶的颜色更鲜艳,而经红外光处理后,上部烟叶的颜色变暗;经红外光处理后,上部烟叶中的多酚类物质总量高于其他组;下部烟叶中检测到最多挥发性成分,且引起各个部位 4 个光源组挥发性成分产生差异的关键化学成分为烟碱和新植二烯;紫外光处理使烟叶中醛类物质含量上升,红外光处理使酯类物质含量上升,白光和红光处理使醇类物质含量上升,其中特征物质戊醛、苯甲酸乙酯和苯乙醇提升明显。因此,4 种光源处理会对烟叶颜色和关键化学成分产生不同程度的影响,可为基于光技术调控烟叶品质提供参考。

关键词:光源辐照;烟叶;颜色;晾晒过程;多酚类物质;挥发性成分

中图分类号:TS44 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2025)05-0072-10

0 引言

烟叶的品质会受到环境条件,如光照、风速、土壤质量、温度、相对湿度等因素的影响。S. C. Zhao 等^[1]研究发现,在烟叶褐变阶段,相对湿度为 70% 的空气固化是改善烟叶品质的最佳选择。微生物群落和酶相关物质转化也会影响烟叶的坚果味、花香、水果味和巧克力味等复杂香味^[2]。光照可影响植物色素的合成并调节相关酶活性,进而影响植物

叶片的呈色和生长,同时,烟叶内部生化特性也可以通过叶片的表现颜色反映出来^[3-4]。研究^[5]发现,烟叶颜色的变化不仅涉及蛋白质等分子的调控,还与物质代谢等一系列复杂的生物过程相关。此外,香味前体物质的含量对烟叶品质有重要影响,决定了烟叶的香气品质,这些物质大多是次生代谢产物^[6]。随着分析技术的不断发展,烟叶中越来越多的香气成分被鉴定出来,这些成分已成为评价烟叶香气和感官品质的重要指标^[7]。

收稿日期:2024-06-17;修回日期:2024-08-23;出版日期:2025-10-15

基金项目:浙江中烟工业有限责任公司科技项目(ZJZY2022B001);浙江省“领雁”研发攻关计划项目(2023C04025)

作者简介:王骏(1978—),男,浙江省杭州市人,浙江中烟工业有限责任公司工程师,主要研究方向为新型烟草及雪茄烟设计开发。E-mail:wangjun@zjtobacco.com

通信作者:蔡铭(1979—),男,浙江省杭州市人,浙江工业大学教授,博士,主要研究方向为农产品及非热加工技术。E-mail:caiming@zjut.edu.cn

光照处理可以改变植物中的化学成分,影响其品质特征。研究^[8]发现,红光在茶叶加工中的应用可显著改善绿茶的香气,赋予茶叶清新、甘甜和醇厚的口感。红光比蓝光更利于提高植物中的叶绿素含量,也有学者认为蓝光会导致叶绿素降解^[9]。目前,光照处理已被应用于烟叶的生长培育过程。研究^[10]发现,随着红光比例的增加,可提高烤后烟叶中总氮和钾含量,同时降低总糖、还原糖、烟碱、淀粉和石油醚提取物的含量;而黄光比例的增加可在整个大田生育期提高烟叶中的烟碱含量,降低总氮含量。紫外光(UV)已经应用于UV灭菌、植物促生长、辐射诱变等多个生物学领域^[11]。张祯岷^[12]认为,适当强度的紫外光处理可促进茶叶挥发性香气物质的释放,提高茶叶香气浓度,但过度照射会降低茶叶挥发性香气物质的浓度和种类。黄勇^[13]研究发现,适宜时间的紫外光处理有利于烟苗主根的生长,但若时间较长,会对烟苗株高、茎粗、叶宽、叶长等性状产生明显影响,具体表现为除茎粗之外,其他性状均呈下降趋势,阻碍了烟叶的正常生长发育。因此,不同光源处理可调控植物内部物质,影响其品质特征。然而,目前有不同光源在烟叶加工过程中的应用与调控研究仍鲜有报道。

晾制对形成烟叶独特的风味特征,提高其内在品质及可加工性起着重要作用^[14],但是,烟叶晾制过程易受环境温度、相对湿度等多种因素影响,造成烟叶品质差异较大,且晾制时间较长,亟需开发新的技术与方法。本文拟通过研究紫外光、红外光、红光和白光这4种光源对晾制过程中烟叶的颜色、多酚类物质和挥发性成分的影响,探明光辐照对烟叶关键化学成分的影响特征,以期对烟叶光辐照晾制技术的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

主要材料:鄂烟1号烟叶上、中和下部各200片,采摘于湖北省恩施州恩施市新塘乡前坪村,采摘时间为2022年9月、10月,叶片成熟度均良好。

主要试剂:甲醇,上海凌峰化学试剂有限公司;乙酸苯乙酯,天津市科密欧化学试剂有限公司;绿

原酸标准品、芸香苷标准品,上海源叶生物科技有限公司;磷酸二氢钾,上海麦克林生化科技有限公司。以上试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

ColorQuest XE 型色差仪,上海信联创作电子有限公司;LC-2030C 3D Plus 型高效液相色谱仪,日本岛津公司;ISQ 型单四级杆气相色谱-质谱联用仪,Thermo 公司;ALPHA2-4LDplus 型真空冷冻干燥机,日本日立公司;GZX-9146MBE 型电热鼓风干燥箱,上海博迅实业有限公司;AK1140 型电子天平,奥豪斯国际贸易有限公司;ML-800 型粉碎机,中国永康天奇盛世有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 光辐照实验及取样 预处理:烟叶除杂后,置于相对湿度80%、温度27℃的自然光环境中平衡24h。

编号及光照处理:将预处理后的烟叶样品分为4组(每组20片),编号为U、R、I、S,分别为紫外光、红光、红外光和白光照射组。上部、中部和下部烟叶编号分别为B、C和X。根据烟叶在晾制期的变化可将其分为新鲜期、变黄期、变褐期、定色期和干筋期,且通常把定色期划分到变褐期^[14-15]。新鲜期、变黄期、变褐期和干筋期依次编号为F、Y、H和D,文中编号采用“光源+部位+照射阶段”组合。由于烟叶在新鲜期未接受光照,所以采用“新鲜(F)+部位”组合。每天光照4h,每种光源照射功率20W,每天照射前判断晾晒阶段。变黄期标志是烟叶整体变黄,变褐期烟叶由黄色转变为褐色,叶尖叶缘逐渐变干,干筋期则指烟叶的主脉完全变干^[16]。在每个阶段节点时取样,处理条件见图1。

在每个阶段节点,每组取12片烟叶(4个阶段共48片),其中,6片直接用于颜色测定,其余6片立即置于真空冷冻干燥仪中干燥后,用粉碎机粉碎,再密封于干燥器内保存,用于香气前体物质和挥发性成分的测定。

1.3.2 色差分析 使用色差仪测量烟叶正反面的色差参数明亮度(L^*)、红绿值(a^*)和黄蓝值(b^*),并计算饱和度(C^*)和色泽比(H^*),计算公式如下^[12]:

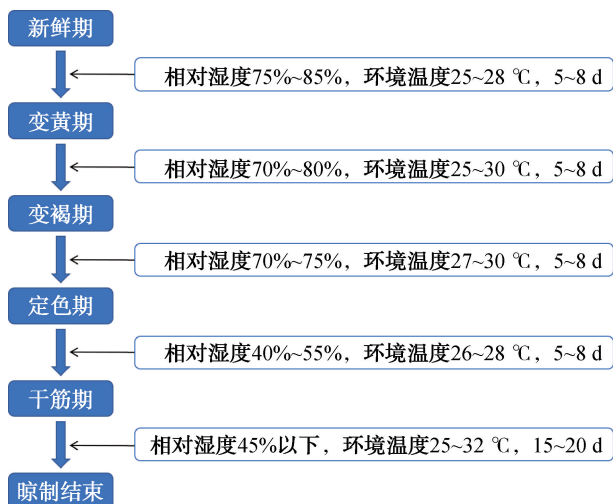


图 1 烟叶晾制过程中各阶段的处理条件

Fig. 1 Treatment conditions in each stage of the tobacco leaf curing process

$$C^* = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})}$$

$$H^* = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

1.3.3 多酚类香气前体物质测定 使用高效液相色谱仪对绿原酸和芸香苷含量进行测定^[17]。称取约 100 mg 样品,准确至 0.1 mg,置于 50 mL 锥形瓶内,再准确加入 20.0 mL 50% (若无特指,百分数均指体积分数)的甲醇水溶液,置于频率为 40 kHz 的超声波振荡器中超声提取 20 min。取约 2 mL 提取液,经 0.45 μm 的水相滤膜过滤,吸取 10 μL 注入高效液相色谱仪中进行定量分析。流动相 A 为 88% 水+10% 甲醇+2% 乙酸溶液,B 为 10% 水+88% 甲醇+2% 乙酸溶液;梯度洗脱,0 min 时,A 为 100%,16.5 min 时,A 为 80%,B 为 20%,30 min 时,A 为 20%,B 为 80%;柱温为 30℃;流速为 1 mL/min;检测波长为 340 nm;分析时间约为 40 min。

利用高效液相色谱仪测定多酚校准溶液,得到 2 种多酚的积分峰面积,以峰面积为纵坐标,多酚质量浓度为横坐标,分别建立 2 种多酚的校正曲线,并对校正数据进行线性回归($R^2 > 0.99$),用于测定烟叶样品中绿原酸和芸香苷的含量/(mg·g⁻¹)。

以干基计多酚的含量,按下式计算:

$$P = \frac{c \times 20}{m(1-w)}$$

式中, P 表示每克样品中的多酚含量/(mg·g⁻¹), c 表示提取样品中多酚的质量浓度/(mg·mL⁻¹),20

为提取溶液体积/mL, m 表示样品的质量/g, w 表示样品的含水量%。

1.3.4 挥发性成分分析 参照文献[18]的方法,并稍作修改。准确称取烟叶干燥样品 1.0 g 置于 20 mL 顶空进样瓶中,添加 50 μL 乙酸苯乙酯(1.011 μg/μL)内标,密封。顶空条件:平衡温度 70℃,平衡时间 20 min,吸附温度 70℃,吸附时间 30 min;从顶空瓶中拔出萃取头并立即插入气相色谱仪进样口,在 250℃下解吸 5 min,进行 GC/MS 检测。色谱柱为 HP-FFAP 石英毛细管(50 m×0.32 mm×0.50 μm);载气为高纯 He;流速为 2.45 mL/min;进样口温度为 250℃;进样模式为不分流进样;升温程序为初始温度 45℃,保持 1 min,以 5℃/min 的速率升温至 230℃,保持 10 min;离子源为 EI 源;电离电压为 70 eV;离子源温度为 230℃;传输线温度为 240℃;扫描方式为全扫描;质量扫描范围为 33~400 amu。

对 4 种不同组别挥发性成分的差异性进行偏最小二乘分析(PLS-DA),根据投影变量重要性(VIP)筛选特征差异性成分,并对这些成分及其他烟叶常见成分进行聚类分析。

1.4 数据处理与分析

所有实验和分析测量均进行 3 次,结果取平均值。利用 Microsoft Excel 2013 进行数据处理,采用 Origin 2021 进行绘图,应用 MetaboAnalyst 平台进行 PLS-DA 分析。

2 结果与讨论

2.1 不同光源处理对烟叶颜色的影响

烟叶在调制过程的不同时期都有其独特的颜色,从绿色到褐色有明显的变化。不同光源处理后烟叶的色度值见图 2。由图 2a)可知,根据亮度参数 L^* ,大多数烟叶的颜色偏暗,其中,经白光处理后的烟叶 L^* 较高,且 SCY 和 UBH 样品分别显示出最高值和最低值。由图 2b)可知,经白光处理后,下部烟叶每一期的 a^* 均较高。其中,SCD 样品的红色最明显,而 FC 样品的绿色最明显。由图 2c)可知,FC 的 b^* 最高。经白光处理后,中部和下部烟叶每一期的 b^* 均为最高值。其中 SCY 和 IBH 样品分别显示出最高值和最低值。另外,在处理初期, b^* 出现了不同幅度的下降,其中以红外光处理后烟叶的 b^*

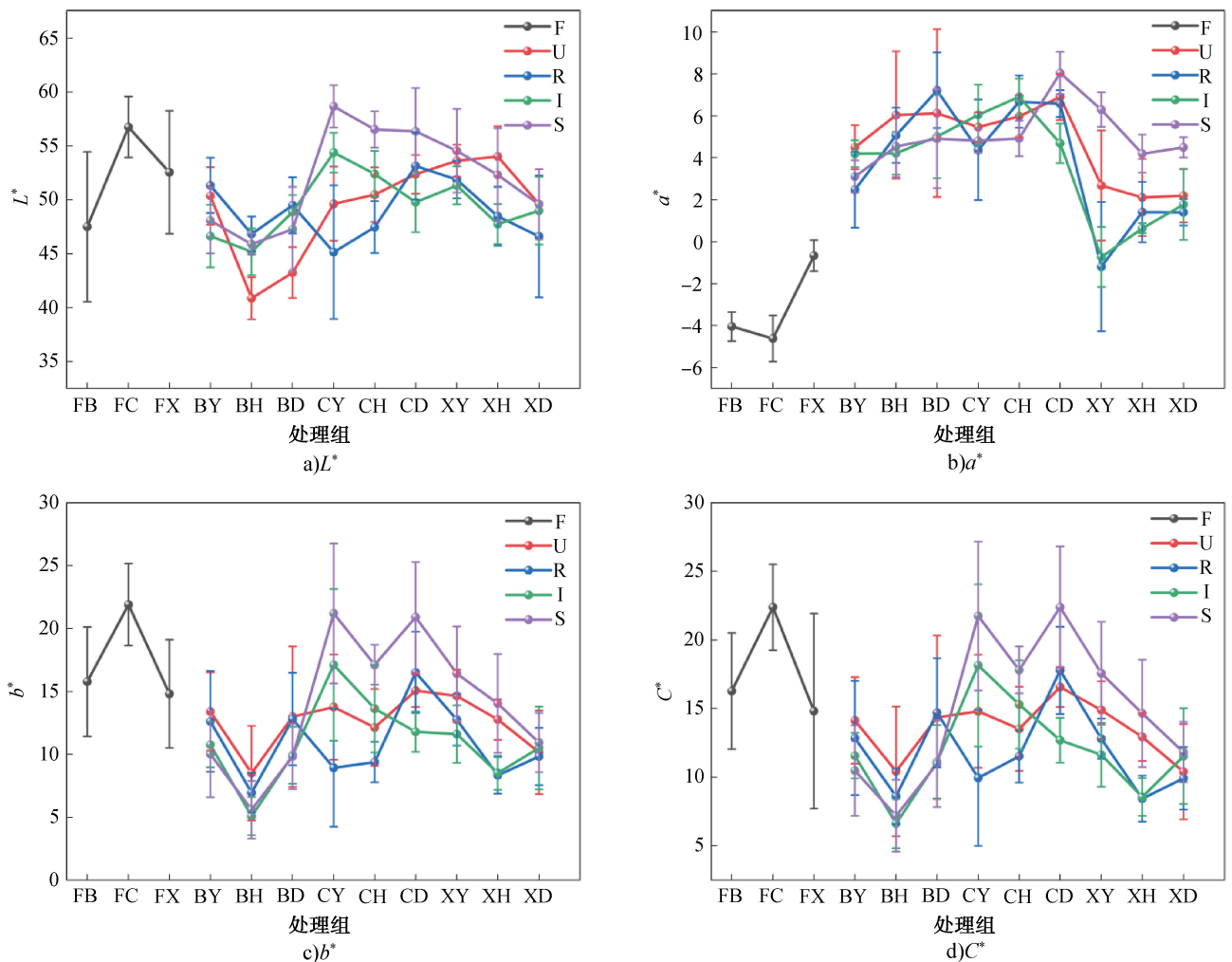


图 2 不同光源处理后烟叶的色度值

Fig. 2 Color values of tobacco leaves treated by different light sources

降低最为显著。靳双珍等^[19]研究发现, b^* 与烟叶中多酚含量呈负相关, 经红外光处理后, b^* 降低导致多酚含量上升, 这与 2.2 的结论相一致。由图 2d) 可知, 在几乎所有处理组中, 烟叶的 C^* 都在变黄期和变褐期出现了不同程度的下降, 而在干筋期有小幅的上升。这主要是因为新鲜烟叶在变黄过程中, a^* 从负值向正值增加, b^* 变化幅度不大, 而 C^* 的大小取决于 a^* 和 b^* 的绝对值大小。SCD 样品显示出最高的颜色强度, 而 ITB 样品的颜色强度最弱。

综合分析, 烟叶经白光处理后, 其饱和度最高, 颜色最鲜艳, 对其色泽产生正面影响, 而经红外光处理后, 其饱和度最低, 颜色最黯淡。杨澜等^[20]研究发现, 总花青素含量与 a^* 呈极显著正相关, 与 L^* 和 b^* 均呈极显著负相关; 叶绿素含量与 L^* 和 a^* 均呈显著负相关, 与 b^* 呈显著正相关。因此, 红外光照射有可能促进烟叶中花青素的累积, 但也会降解

烟叶中的叶绿素。类胡萝卜素可以有效保护叶绿素分子, 使其在强光下不被氧化破坏, 还能吸收光能并传递给叶绿素 a ^[21]。因此, 白光处理可能导致类胡萝卜素含量上升, 使烟叶色彩鲜艳, 外观更佳。这与杨利云^[22]的研究结果相似。

2.2 不同光源处理对烟叶多酚类香气前体物质的影响

烟叶中多酚类香气前体物质的含量及种类对其香气和吸味有着重要影响, 是评估烟叶品质的重要标准^[6]。不同部位的烟叶中多酚类物质的含量存在显著差异^[22], 绿原酸和芸香苷是烟叶中最主要的多酚类物质^[23]。不同光源处理对烟叶香气前体物质的影响见图 3。由图 3a) 可知, 各部位烟叶在经白光处理后, 下部和中部烟叶中绿原酸和芸香苷含量减少, 而其在上部烟叶中的含量增加, 至变黄期和变褐期绿原酸含量达到最高值。经红光处理后,

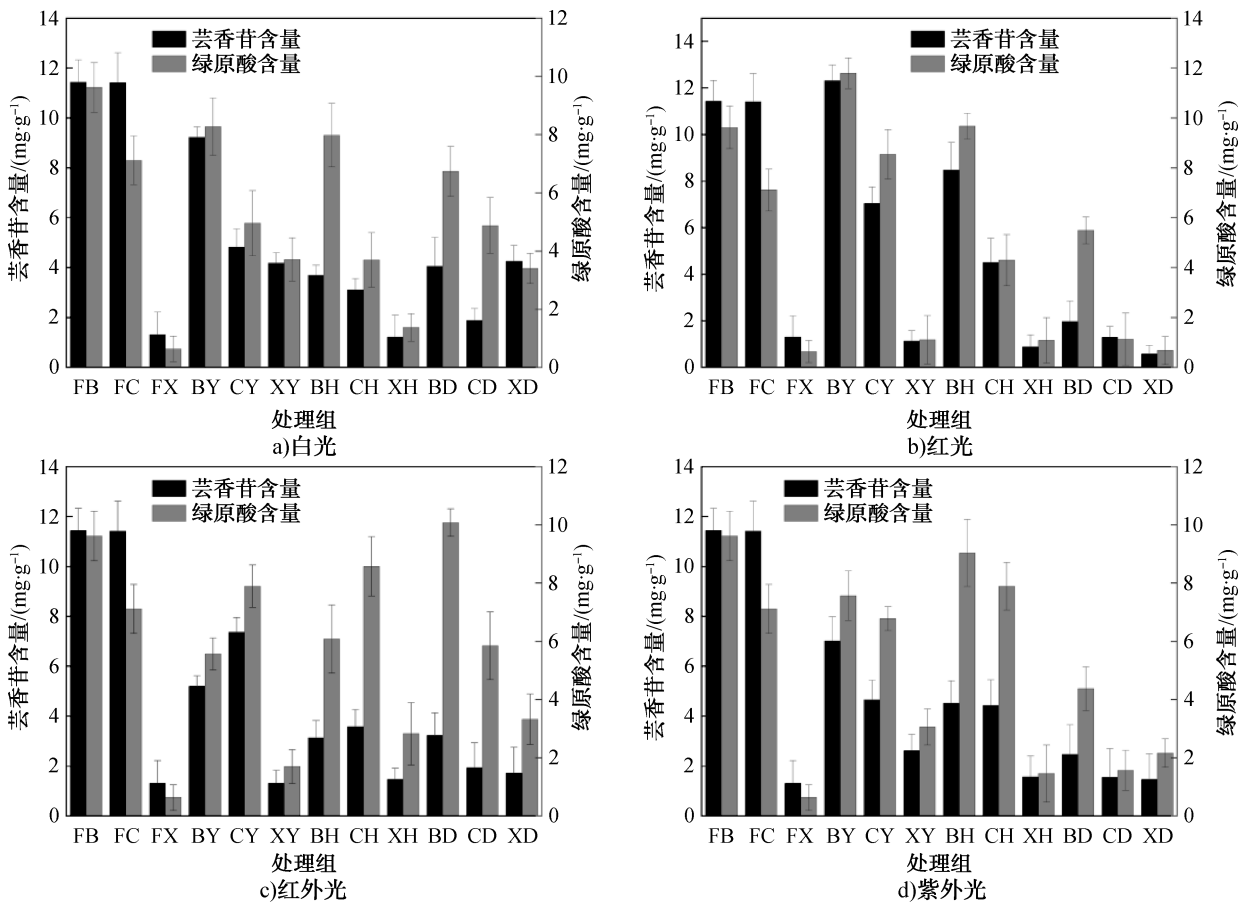


图 3 不同光源处理对烟叶香气前体物质的影响
Fig. 3 Effects of different light sources on aroma precursors in tobacco leaves

烟叶中的香气前体物质含量远低于白光组,这与报道^[24]的在红光照射下烟叶合成的酚类物质含量较少的结果一致。由图 3b)可知,经红光处理后,上部烟叶中芸香苷和绿原酸含量在变黄期最高,而在中部和下部烟叶中,芸香苷含量逐渐减少,绿原酸含量在变褐期达到最高值。

由图 3c)可知,经红外光处理后,烟叶中的绿原酸含量明显高于红光和白光组,上部烟叶在干筋期的绿原酸含量达到最高值。因此,红外光照射可能会抑制绿原酸的转化。芸香苷含量则在红外光照射影响下快速减少后进入稳定期。由图 3d)可知,经紫外光处理后,烟叶中的绿原酸含量较高,仅次于红外光,这可能是紫外照射激发了烟叶的生态适应性,增加了叶片中多酚类紫外吸收物质^[25],且在上部烟叶变褐期达到最高值。综上可知,上部烟叶在 4 种光源处理下的多酚类香气前体物质含量都较高。不同波段光源会触发不同光受体,如光敏色素、隐花色素、向光素紫外光受体^[26-27],进而会影响植物的次生代谢。综合分析,经红外光处理更有利

于保留烟叶中的多酚类香味前体物质。

2.3 不同光源处理对挥发性成分的影响

2.3.1 不同光照处理后烟叶中挥发性成分种类和含量分析 新鲜烟叶的挥发性成分可分为醛类、酸类、醇类、酯类、烷烃类、酮类、烯醇类、酚类、烯烃类、醚类、萜类、氮杂环类等。经紫外光处理后,烟叶各部位的物质种类都有所下降,可能因为其对烟叶的作用主要与细胞内的光化学变化有关。增强紫外光照射会增加植物体内活性氧的产生速率,这些高活性氧化基团能够进入烟叶细胞内部,引发一系列的生理生化作用^[28]。经红光处理后,下部烟叶的挥发性成分种类最多,已有研究^[29]表明,较高强度的红光照射可显著提高凋萎叶前中期的挥发性成分总量,这与本文研究结果较一致。不同处理后上部、中部和下部烟叶挥发性成分含量见表 1。由表 1 知,经紫外光处理后,烟叶中醛类、醇类和酯类物质含量显著下降。这可能是紫外光的直接作用及感光化学效应产生的活性分子与自由基的间接作用共同导致的烟叶内部物质被氧化^[30]。许春平等^[11]

表 1 不同处理后上部、中部、下部烟叶挥发性成分相对含量
Table 1 The relative content of volatile components in upper, middle and lower
leaves after different treatments

化合物	上部烟叶挥发性成分相对含量					中部烟叶挥发性成分相对含量					下部烟叶挥发性成分相对含量					%
	FB	RBD	IBD	SBD	UBD	FC	RCD	ICD	SCD	UCD	FX	RXD	IXD	SXD	UXD	
3-甲基丁醛	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.54	0.33	0	0	0	
1-甲氧基-2-丙醇	0	0.17	0	0.2	0	0	0	0	0.33	0	0	0	0	0.18	0	
戊醛	1.04	0	0.18	0	2.06	1.90	0	0.23	0.31	2.46	0.14	0.23	0.38	0.27	0.56	
(E)-2-戊烯醛	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.22	0	0.15	0	
2,3-丁二醇	0	0	0.17	0	0	0.12	0	0	0.32	0	3.53	0	0	0	0	
十六醛	0	0.15	0.11	0.15	0.02	0	0	0.19	0	0	0.10	1.07	0.47	1.05	0	
1-(3,3-二甲基 环氧乙烷基)乙酮	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.15	0	0	0	
己烯醛	0.17	0	0	0	0	0.12	0	0	0.17	0	0	0	0	0	0	
2,6-二甲基吡啶	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.75	0	0	0	
3-甲基环戊基乙酸酯	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.61	0	0.31	0	
5,5-二甲基- 2(5H)-呋喃酮	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.21	0	0	0	
2-戊基呋喃	0	0	0	0.11	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2-(2-戊烯基)呋喃	0	0	0	0.16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
苯甲醇	2.26	1.46	0.68	1.18	0.80	1.37	1.02	1.43	0.87	0.21	0.44	0.13	1.15	0.32	0.08	
2,6-二甲基- 2,6-辛二烯	0.79	0	0	0	0	1.79	0	0	0.17	0	0.31	0.22	0.46	0.80	0.26	
3-萹烯	0	0	0	0	0	0	0	0	0.34	0	0	0	0	0	0	
(E,E)-3,5- 辛二烯-2-酮	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0.23	0	
3,5-二甲基- 1,6-庚二烯	0	0	0	0	0	0.39	0	0	0	0	0.05	0.63	0	0.40	0	
7-甲基-3- 甲基-6-辛烯醛	0.27	0	0	0	0	0	0	0	0.47	0	0	0	0	0	0	
5-甲基-3- 己烯-2-酮	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.80	0	0	0	
正壬醇	0.37	0.23	0.20	0.22	0.18	0.50	0	0.51	0.89	0	0.22	0	0.43	0	0.26	
3-甲基-1H-吡唑	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.76	0	0	0	
苯乙醇	0.50	1.07	0.31	0.92	0	0.23	0.77	0.77	0.85	0.04	0.19	0.34	0.26	0.51	0.19	
4,8-二甲基- 1,3,7-壬三烯	0.20	0	0	0	0	0.29	0	0	18.47	0	0	0	0	0	0	
壬酸烯丙酯	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.31	0	0	0	
苯甲酸乙酯	0.25	0.11	0.35	0.12	0.09	0.29	0.07	1.16	0.99	0	0.09	0.08	0.33	0.21	0.03	
松脂-4-醇	1.76	0.91	0.72	0.46	0.31	1.03	0.52	0.50	0	0	0.47	0.51	1.04	0.67	0.49	
2-癸烯-1-醇	0.14	0	0	0	0.04	0.24	0	0.22	0	0	0	0.42	0.13	0	0	
苯乙酸乙酯	0.10	0	0	0	0.08	0.32	0	0.30	0.57	0	0.13	0	0	0	0	
十三烷	0.85	0.67	0	0	0	0.72	0	0.67	7.84	0	0	0	0.83	0.34	0	
烟碱	44.6	44.25	67.23	61.67	61.95	38.7	60.42	66.03	53.98	49.04	34.36	43.92	56.75	30.07	48.58	
茄酮	0.69	0.78	0.73	0.84	0.51	0.93	0.73	0.87	0.68	0.83	0.23	0.55	0.37	1.17	0.48	
十六烷	0.85	0.92	0.75	0.93	0.57	1.06	0.94	1.15	0	0.57	0.88	1.23	1.22	0.85	0.80	
3-亚甲基十三烷	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30.07	0	
香叶基丙酮	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.58	0.8	0.5	0	0.38	
1-(乙烯基氧基) 十八烷	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1-二十烷醇	0	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
香叶基丙酮	0.85	0.37	0.17	0.31	0.35	2.28	0.19	2.12	0.4	0.3	0	0	0	0	0	

表1(续)

化合物	上部烟叶挥发性成分相对含量					中部烟叶挥发性成分相对含量					下部烟叶挥发性成分相对含量				
	FB	RBD	IBD	SBD	UBD	FC	RCD	ICD	SCD	UCD	FX	RXD	IXD	SXD	UXD
3,7,11-三甲基-6,10-十二烷二烯-1-炔-3-醇	0	0	0	0	0	0.27	0	0.25	0	0	0.06	0.05	0	0	0
6-甲基十八烷	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	0	0	0	0	0
(Z,E)-2,13-十八碳二烯-1-醇	0	0.16	0	0	0	0.04	0	0	0.19	0	0.05	0.6	0.2	0.45	0
新植二烯	7.72	8.39	9.23	3.1	3.35	19.48	2.20	21.13	6.51	17.43	3.54	1.76	3.22	2.61	2.31

研究发现,呋喃类物质在紫外光照射 60 min 前呈先降低后升高的趋势。经紫外光处理后的烟叶比其他光源处理的烟叶更具焦甜味,可能是由于 2-戊基呋喃含量的提升所致。经红外光处理后,烟叶的刺激性加强,可能是由于烟碱含量提升所致^[23]。新植二烯含量发生明显上升,说明红外光可能促进了叶绿素的降解^[31]。经不同光源处理后,烟叶中酮类物质含量较鲜叶期显著降低,尤其是在红光处理后茄

酮显著减少,这可能是因为红光波长较长、能量较高,能够加强叶片的生命代谢活动,包括对细胞的破坏、叶片水分的变化及前体物质的消耗^[29]。经白光处理后,烟叶中醛类物质含量下降,说明白光有利于醛类物质的挥发。

2.3.2 光源处理后挥发性成分的差异性分析 光照处理后挥发性成分的 PLS-DA 分析结果见图 4。由图 4a)可知,经 4 种光源处理后,上部烟叶的挥发

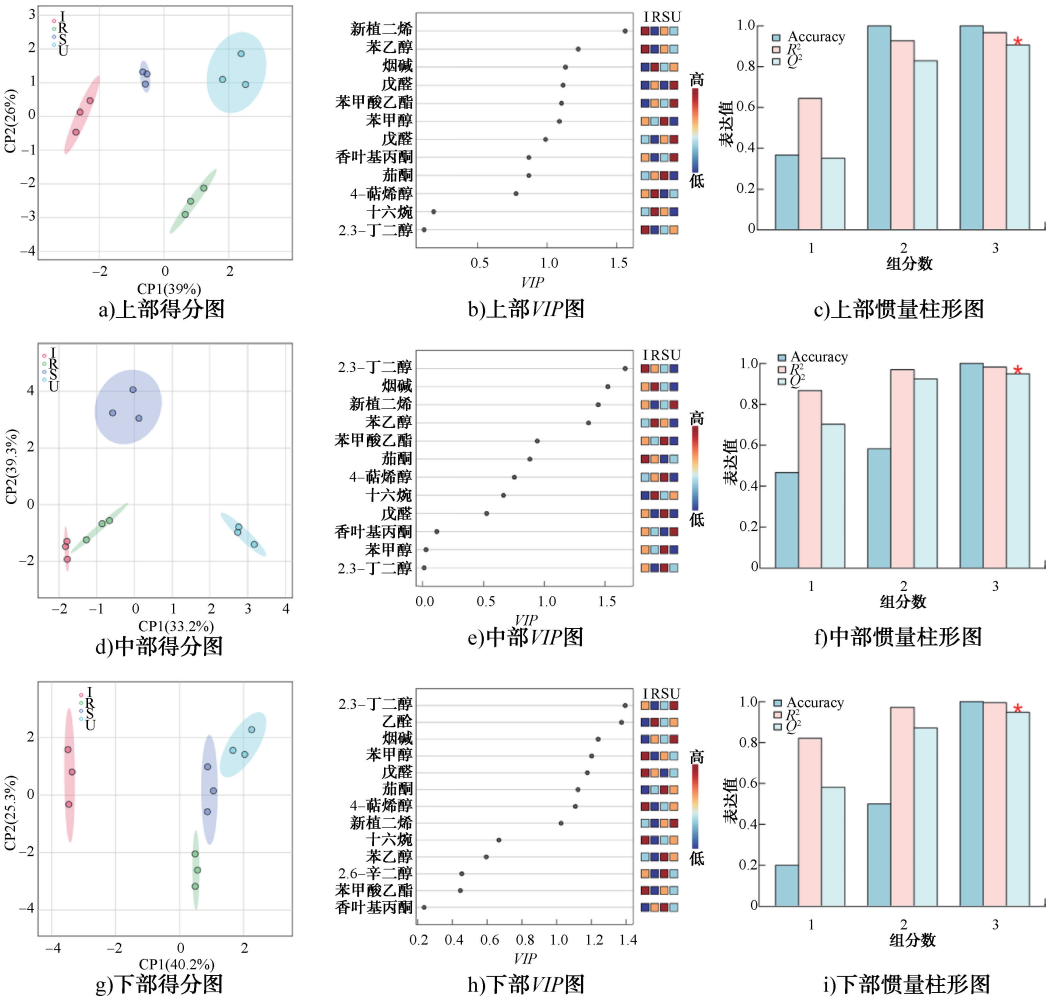


图 4 光照处理后挥发性成分的 PLS-DA 分析结果
Fig. 4 PLS-DA analysis of volatile components after light exposure treatment

性成分含量存在显著差异,其中经紫外光处理后的组内差异较大。 $VIP>1$ 的挥发性成分为主要特征差异物质。由图 4b) 可知,主要差异物质为萜烯类、醇类、生物碱和醛类物质。由图 4d) 可知,中部烟叶中红光与红外光处理组之间差异较小,但这两组与紫外光和白光处理组之间差异较大。这可能是由于红光与红外光的波长较为接近,所造成的影响相似所致。白光组表现出较大的组内差异,可以解释的原始数据信息较多。由图 4e) 可知,主要差异物质为醇类、生物碱和萜烯类物质。由图 4g) 可知,4 个处理组之间具有一定的差异,其中紫外光、红光与白光处理组之间差异相对较小,红外光与其他处理组之间存在较大差异。由图 4h) 可知,主要差异物质为醇类、醛类、生物碱和酮类物质。惯量柱形图中 R^2 为相关性系数,代表着模型的解释能力; Q^2 表示模型的预测效果。由图 4c)、4f) 和 4i) 可知,3 个部位模型的 R^2 与 Q^2 都接近 1,因此模型都具有较好的解释性和预测性,能较大程度反映真实数据。

2.3.3 光照处理后挥发性成分含量的聚类分析

不同光照对烟叶中关键挥发性成分含量变化见图 5。由图 5a) 可知,将光源处理后的挥发性成分根据含量变化趋势由上到下分为 A、B、C 类,每一类在图中已圈出。红光和白光处理对 A 类物质起上调作用,紫外光、白光和红外光处理对 C 类物质起到上调作用。其中,醛类物质在紫外光处理后发生明显上调,特征物质戊醛上调明显,可能是由烟草中含有非挥发性的多元有机酸和高级脂肪酸所致^[32]。以往研究^[32]发现,经紫外光照射后,烟叶内高级不饱和脂肪酸及其甲酯在受热分解后很容易引起醛类物质含量上升。醇类物质含量经红光处理后发生显著上升,苯乙醇含量上升明显,其在烟叶中的可能来源是细菌发酵,说明红光可能有助于促进细菌代谢产生该物质。但其他大多数物质含量在红光处理下均减少,可能是因为红光能量较高,会消耗香气前体物质^[29],这与 2.2 中得出的结论较一致。

在鲜叶中,B 类物质含量较高,但经各光源处理后都呈减小趋势,表明光源处理可能会促进烟叶中这些物质的挥发。由图 5b) 可知,各光源处理对醇

类和醛类物质均表现出上调作用,说明在烟叶中这两类物质的生成量大于其挥发量。B 类物质主要包括烯醇类、酮类和烯炔类物质,其下调趋势与上部烟叶的结果相似,且物质种类也大致相同,说明光源处理会明显促进这些物质的挥发。然而,烯醇类物质在白光处理下的挥发量并未显著高于其他光源,说明白光还是更有助于促进物质的生成,而不仅仅是促进挥发。酯类物质经红外光处理后含量上升,其中特征物质苯甲酸乙酯含量上升明显。这

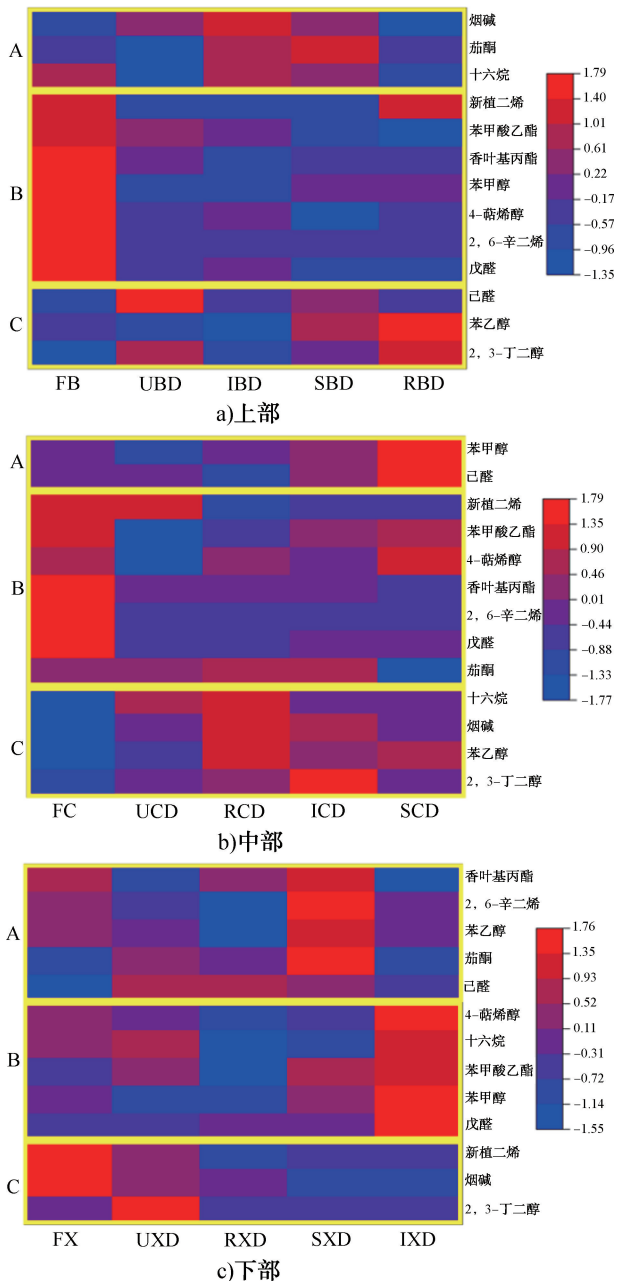


图 5 不同光照对烟叶中关键挥发性成分含量变化
Fig. 5 Changes in key volatile components in tobacco leaves under different light exposure treatment

可能是因为红外光促进了脂肪酸代谢途径中香气成分的合成,相关酶的活性因受红外光照射而提高,从而促进了酯类物质的生成^[29]。此外,C类物质在经各光源处理后都呈上调趋势。

由图 5c)可知,多种物质经不同光照处理后均有不同程度的上调。这可能是因为下部烟叶接触的阳光和空气较少,不利于某些物质的挥发,而光源处理可能促进了部分物质的分解,进而产生了所分析的物质。经白光处理后,烟叶中醇类、烯炔类和酮类物质上调明显。这可能是由于白光照射会引发苯丙氨酸脱羧酶促进苯丙氨酸代谢、 β -葡萄糖苷酶促进苯丙烷合成、脂氧合酶催化多元不饱和脂肪酸降解等一系列生化反应,从而显著提高了醇类物质的含量^[33]。经红外光处理后,酯类、烷烃和烯醇类物质上调明显,部分酮类物质还可能进一步转化为橙花叔醇。

3 结论

本文采用紫外光、红外光、红光和白光 4 种光源对烟叶晾晒过程的色差、多酚类物质和挥发性成分等关键指标进行对比分析,发现 4 种光源照射使烟叶的颜色和化学成分产生了差异性变化。其中,红外光和白光处理对烟叶的颜色影响显著,即红外光使烟叶颜色变暗淡,而白光处理则表现出较高的颜色强度。红外光处理后烟叶的多酚类物质含量增加最多,更有利于保持烟叶的风味特征。经 4 种光源处理后,烟叶的挥发性成分含量出现显著差异。紫外光处理促进了醛类物质的增加,红外光处理使酯类物质增多,而白光和红光则促进了更多醇类物质的生成。此外,特征物质戊醛、苯甲酸乙酯和苯乙醇的含量提升明显,但红光处理后,其他多种挥发性成分含量有所下降。因此,不同光源处理会对烟叶的特征产生不同影响,可通过调控烟叶的晾晒过程,提升烟叶品质。

参考文献:

[1] ZHAO S C, WU Z Y, LAI M, et al. Determination of optimum humidity for air-curing of cigar tobacco leaves during the browning period [J]. *Industrial Crops and*

Products, 2022, 183: 114939.

[2] WU Q Y, PENG Z, PAN Y, et al. Interaction analysis of tobacco leaf microbial community structure and volatiles flavor compounds during cigar stacking fermentation [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1168122.

[3] 杨月先. 镁肥施用和光照晾晒对雪茄茄烟叶颜色及品质的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.

[4] 姜卫兵, 庄猛, 韩浩章, 等. 彩叶植物呈色机理及光合特性研究进展 [J]. *园艺学报*, 2005, 32(2): 352-358.

[5] MENG Y, WANG Y H, GUO W M, et al. Analysis of the relationship between color and natural pigments of tobacco leaves during curing [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 166.

[6] 刘冰洋, 张小全, 张堃堃, 等. 气象因子对高香气烤烟品种主要香味前体物含量的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(9): 1214-1222.

[7] 向羽, 周成, 黄楚天, 等. 结构优化对不同叶位烟叶品质及挥发性物质含量的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(10): 15-20.

[8] HE Y Y, LI J J, MEI H L, et al. Effects of leaf-spreading on the volatile aroma components of green tea under red light of different intensities [J]. *Food Research International*, 2023, 168: 112759.

[9] 方平, 杨鹤, 牛晨, 等. 不同 LED 光质对人参种苗叶片生理特性和超微结构的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(12): 3864-3487.

[10] 贾方方. 不同光照处理对烤烟品质的影响及氮化物的高光谱监测研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.

[11] 许春平, 杨琛琛, 郑凯, 等. UV 照射对低次烟叶中性香味物质和常规化学成分的影响 [J]. *烟草科技*, 2014, 47(7): 64-68.

[12] 张祯颀. UV-B 对茶叶挥发性化合物形成的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[13] 黄勇. 烟叶结构与代谢产物差异及光因素影响的研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.

[14] 钟俊文, 王正浩, 马丽娟, 等. 晾晒烟调制研究进展 [J] *中国农学通报*, 2023, 39(7): 146-152.

[15] 戴飞, 丁才夫, 吴宝成, 等. 适应高山烟区的白肋烟晾晒模式研究 [J] *广东农业科学*, 2020, 47(8): 7-14.

[16] 周康, 周文, 徐恒, 等. 国产雪茄烟叶调制技术研究进展 [J]. *农业科学*, 2022, 12(8): 692-697.

[17] 国家烟草专卖局. 烟草及烟草制品 多酚类化合物绿原酸、莨菪亭和芸香苷的测定: YC/T 202—2006 [S].

[18] 邓波, 王维维, 张小涛, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱/质谱联用法结合化学计量学分析白肋烟烘焙前后挥发性、半挥发性成分 [J]. *色谱*, 2019, 37(12): 1373-1382.

[19] 靳双珍, 李雁斌, 杨玉坤, 等. 烤烟颜色特征值对多酚物质的影响 [J]. *天津农业科学*, 2018, 24(9): 56-59, 76.

[20] 杨澜, 张朝君, 杜致辉, 等. LED 红蓝光补光促进多肉植物马库斯叶片转色 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50

(16):128-132.

[21] 赵铭钦,王文基,刘国顺,等.不同成熟度对烤后烟叶中质体色素及其降解产物的影响[J].植物生理学通讯,2009,45(1):8-12.

[22] 杨利云.不同光质对烟草生长发育、光合特性及多酚代谢的影响[D].昆明:云南师范大学,2014.

[23] 徐秀红,刘金亮,李栋成,等.不同类型烟草种质的烟碱含量变化与相关基因表达水平[J].浙江农业学报,2020,32(9):1555-1563.

[24] 阎秀峰,王洋,李一蒙.植物次生代谢及其与环境的关系[J].生态学报,2007,27(6):2554-2562.

[25] KONG Q J, ZHANG H J, GAO Q C, et al. Ultraviolet C irradiation enhances the resistance of grape against postharvest black rot (*Aspergillus carbonarius*) by regulating the synthesis of phenolic compounds[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140509.

[26] MÖGLICH A, YANG X J, AYERS R A, et al. Structure and function of plant photoreceptors[J]. Annual Review of Plant Biology, 2010, 61: 21-47.

[27] RIZZINI L, FAVORY J J, CLOIX C, et al. Perception of UV-B by the *Arabidopsis* UVR8 protein[J]. Science, 2011, 332(6025): 103-106.

[28] 林云,陈森林,胡男君,等.紫外光照射时间对低次醇化烟叶质量的影响[J].中国烟草学报,2021,27(6): 58-66.

[29] 林家正,涂政,陈琳,等.红光萎凋对茶叶挥发性成分及其成品红茶品质的影响[J].茶叶科学,2021,41(3):393-405.

[30] 许春平,孟丹丹,朱国成,等.紫外辐照对再造烟叶涂布液挥发性香味成分的影响[J].轻工学报,2019,34(6):24-32.

[31] 杜康,张尉,顾丽莉,等.初烤烟叶中烟碱和新植二烯的提取工艺研究[J].核农学报,2021,35(6): 1394-1401.

[32] 黄勇,周冀衡,郑明,等.UV-B对烟草生长发育及次生代谢的影响[J].中国生态农业学报,2009,17(1): 140-144.

[33] 魏守辉,肖雪梅,钟源,等.日光温室不同时段补光对番茄果实品质及挥发性物质影响[J].农业工程学报,2020,36(8):188-196.

Effects of four types of light sources irradiation on the color and key chemical composition of tobacco leaves

WANG Jun¹, JIANG Jian¹, ZHAO Liang¹, XU Jian¹, HU Anfu¹, JIN Yixiao¹, DING Ning¹, CAI Ming²

1. China Tobacco Zhejiang Industrial Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. College of Food Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China

Abstract: To optimize the light-regulation technology for tobacco leaf curing, four types of light sources (ultraviolet, infrared, red, and white light) were used to comparatively analyze key indicators such as color, polyphenolic substances, and volatile components during the fresh, yellowing, browning, and dry-gluten stages of curing for tobacco leaves from the upper, middle, and lower positions. This study explored the effects of different light-source irradiation on the color and key chemical components of tobacco leaves. The results showed that after white light treatment, the color of middle-position tobacco leaves was brighter, while after infrared light treatment, the color of upper-position tobacco leaves became darker. The total content of polyphenolic substances in upper-position tobacco leaves after infrared light treatment was higher than the total content of polyphenolic substances in other groups. The lower-position tobacco leaves had the highest content of volatile components. The key substances causing differences in volatile components among the four light-source groups for each position were nicotine and neophytadiene. Ultraviolet light treatment increased the aldehydes content in tobacco leaves, infrared light treatment increased the esters content, and white light and red light treatments increased the alcohols content. Among them, the characteristic substances pentanal, ethyl benzoate, and phenethyl alcohol increased significantly. Therefore, the four types of light-source treatments have different degrees of influence on the color and key chemical components of tobacco leaves, providing a reference for regulating tobacco leaf quality based on light technology.

Key words: light irradiation; tobacco leaves; color; curing process; polyphenol; volatile component

[责任编辑:王晓波 贾学伟]