

# 不同叶色紫苏叶抑菌能力比较及其与叶色值和化学成分的相关性分析



刘雯丽<sup>1#</sup>, 杨美琴<sup>2#</sup>, 李灵犀<sup>1</sup>, 聂黎行<sup>2, 3, 4</sup>, 康 帅<sup>2, 3, 4</sup>, 于健东<sup>2, 3, 4</sup>, 程显隆<sup>2, 3, 4</sup>,  
林永强<sup>2, 3, 4</sup>, 魏 锋<sup>2, 3, 4</sup>

1. 沈阳药科大学功能食品与葡萄酒学院 (沈阳 117004)
2. 中国食品药品检定研究院 (北京 102629)
3. 药品监管科学全国重点实验室 (北京 102629)
4. 世界卫生组织传统医药合作中心 (北京 102629)

**【摘要】目的** 首次系统比较了双紫紫苏叶 (PP)、面绿背紫紫苏叶 (GP)、双绿紫苏叶 (GG) 的抑菌能力, 并分析抑菌能力与紫苏醛、迷迭香酸、花青素的含量, 以及红色像元分量均值 (R 值)、绿色像元分量均值 (G 值)、蓝色像元分量均值 (B 值)、红绿色 (a\*) 值、黄蓝色 (b\*) 值、亮度 (L\*) 值、总色 (E\*ab) 值 7 种叶色色数值间的关系。**方法** 采用微量稀释接种的方式测定不同叶色紫苏叶对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的最低抑菌浓度 (MIC), 结合偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 法探讨不同叶色紫苏叶抑菌能力的差异。利用 Pearson 相关系数对紫苏醛、花青素、迷迭香酸的含量和 7 种叶色色数值及抑菌活性之间的关联性进行系统性分析, 以揭示抑菌能力与颜色特征及化学成分之间的内在联系。**结果** PP、GP、GG 均具有一定的抑菌能力, 不同叶色紫苏叶醇提物对金黄色葡萄球菌的抑菌活性排序为: GP > PP > GG; 对铜绿假单胞菌的抑菌活性排序为: GP > GG > PP。PLS-DA 结果显示, 不同叶色紫苏叶各自归为一类, 并筛选出花青素、R 值、b\* 值、E\*ab 值、10104-H、6538-L、L\* 值、紫苏醛、26003-L 9 个关键差异性成分。相关性分析显示, 金黄色葡萄球菌的 MIC 与迷迭香酸及铜绿假单胞菌的 MIC 与紫苏醛均呈负相关。**结论** 本研究揭示了不同叶色紫苏叶抑菌能力的差异, 其中 GP 抑菌能力最强, 紫苏叶中迷迭香酸、紫苏醛的含量越高, 其抑菌能力越强。

**【关键词】** 紫苏叶; 抑菌能力; 色数值; 化学成分; 相关性

**【中图分类号】** R284.1

**【文献标识码】** A

## Comparative analysis of antibacterial activity of *Perilla Folium* with different leaf colors and its correlation with leaf color values and chemical constituents

LIU Wenli<sup>1#</sup>, YANG Meiqin<sup>2#</sup>, LI Lingxi<sup>1</sup>, NIE Lixing<sup>2,3,4</sup>, KANG Shuai<sup>2,3,4</sup>, YU Jiandong<sup>2,3,4</sup>, CHENG Xianlong<sup>2,3,4</sup>,  
LIN Yongqiang<sup>2,3,4</sup>, WEI Feng<sup>2,3,4</sup>

1. Faculty of Functional Food and Wine, Shenyang Pharmaceutical University, Shenyang 117004, China
2. National Institutes for Food and Drug Control, Beijing 102629, China
3. National Key Laboratory of Pharmaceutical Regulatory Science, Beijing 102629, China
4. World Health Organization Collaborating Centre for Traditional Medicine, Beijing 102629, China

DOI: 10.12173/j.issn.2097-4922.202512102

基金项目: 国家重点研发计划中医药现代化专项 (2023YFC3504100); 药品监管科学全国重点实验室课题 (2024SKLDRS0202)

#共同第一作者

通信作者: 聂黎行, 博士, 正高级研究员, 硕士研究生导师, Email: nielixing@163.com

<https://yxqy.whuzhmedj.com>

#Co-first authors: LIU Wenli and YANG Meiqin

Corresponding author: NIE Lixing, Email: nielixing@163.com

**【Abstract】 Objective** To systematically compare the antibacterial activities of *Perilla Folium* with double-purple (PP), *Perilla Folium* with green-fronted and purple-backed (GP), and *Perilla Folium* with double-green (GG) for the first time, and to analyze the relationship between antibacterial activity and the contents of perillaldehyde, rosmarinic acid, anthocyanins, the mean red pixel component (R value), mean green pixel component (G value), mean blue pixel component (B value), red-green ( $a^*$ ) value, yellow-blue ( $b^*$ ) value, lightness ( $L^*$ ) value, and total color ( $E^*ab$ ) value. **Methods** The minimum inhibitory concentration (MIC) of *Perilla Folium* with different leaf colors against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* were determined using the microdilution method. Combined with partial least squares discriminant analysis (PLS-DA), the differences in antibacterial activity among perilla leaves with varying leaf colors were explored. Pearson correlation coefficients were systematically analyzed to examine associations among perillaldehyde, anthocyanin, and rosmarinic acid content, seven leaf color values, and antibacterial activity. This revealed intrinsic links among antibacterial capacity, color characteristics, and chemical composition. **Results** PP, GP, and GG all exhibited antibacterial activity. The antibacterial activity of ethanol extracts of perilla leaves with different leaf colors against *Staphylococcus aureus* was ranked as GP > PP > GG, while the antibacterial activity against *Pseudomonas aeruginosa* was ranked as GP > GG > PP. PLS-DA results showed that perilla leaves of different leaf colors formed distinct clusters. Nine key differential components were identified: anthocyanin, R value,  $b^*$  value,  $E^*ab$  value, 10104-H, 6538-L,  $L^*$  value, perillaldehyde, and 26003-L. Correlation analysis revealed that the MIC of *Staphylococcus aureus* was negatively correlated with rosmarinic acid, while the MIC of *Pseudomonas aeruginosa* was negatively correlated with perillaldehyde. **Conclusion** The study revealed differences in antibacterial activity among perilla leaves with varying leaf colors, with green-fronted, purple-backed leaves exhibiting the strongest antibacterial effect. Higher levels of rosmarinic acid and perillaldehyde in perilla leaves correlated with enhanced antibacterial capacity.

**【Keywords】** *Perilla Folium*; Antibacterial activity; Color values; Chemical composition; Correlation

紫苏 [*Perilla frutescens* (L.) Britt.] 是唇形科一年生草本植物，又名苏子、苏麻、香苏、桂苕等，其茎、叶和种子均可用作中药材，其中以紫苏叶最为常用。紫苏叶在我国广泛栽培，因种内变异导致其叶色呈现显著多样性<sup>[1]</sup>。古代的本草文献对不同叶色紫苏叶就已经有了明确的记载和区分。例如，《本草图经》<sup>[2]</sup>记载：“苏，紫苏也……叶下紫色而气甚香”，而《本草经集注》<sup>[3]</sup>则描述双面绿色紫苏叶为“荏，状如苏，高大色白，不甚香”。紫苏叶分为双面紫色、面绿背紫和双面绿色3种类型<sup>[4]</sup>。现行药品标准对不同叶色紫苏叶的药用标准亦有所区分：《中国药典》2025年版<sup>[5]</sup>规定，紫苏叶【性状】为“两面紫色或上表面绿色，下表面紫色”，其功能为解表散寒、行气和胃，可用于治疗风寒感冒、咳嗽呕恶、妊娠呕吐及鱼蟹中毒等症；《广东中药材标准（第三册）》<sup>[6]</sup>中双面绿色紫苏叶【性状】为

“两面黄绿色至黄棕色”，其功能为具有解表、散寒、理气、消食的功效，用于感冒风寒、恶寒发热、咳嗽、气喘、食积、吐泻、冷痢。尽管传统药用体系中紫色紫苏叶占据重要地位，但关于不同叶色紫苏叶抑菌活性差异的系统性研究仍较为缺乏。

现代研究表明，紫苏叶含有挥发油、黄酮类、酚酸类、花青素等多种生物活性，具有抗炎、抑菌、抗肿瘤、抗抑郁等多种药理作用。已有文献报道，紫苏叶提取物及其活性成分对多种常见食源性致病菌均表现出显著的抗菌活性。例如，段江莲等<sup>[7]</sup>研究发现，紫苏叶提取物对金黄色葡萄球菌、大肠埃希菌和枯草芽孢杆菌等6种常见食物腐败菌均具有抑制作用。进一步研究显示，紫苏叶油的抗菌机制可能涉及抑制细菌黏附、干扰菌体发育繁殖以及破坏细胞结构完整性等方面<sup>[8]</sup>。魏磊等<sup>[9]</sup>在紫苏叶总三萜类对

10种常见致病菌抑菌作用的分析结果表明,紫苏叶对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌均具有较强的抑菌能力。提取工艺方面,周潇等<sup>[10]</sup>采用醇提工艺获得的紫苏叶提取物对金黄色葡萄球菌表现出较强的抑菌效果。此外,闫小杰等<sup>[11]</sup>通过牛津杯法和菌落计数法证实,紫苏叶醇提取物对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌具有明显的生长抑制作用。

近年来,尽管关于紫苏叶抑菌能力的研究已取得一定的进展,但是针对不同叶色紫苏叶的抑菌能力差异,及其抑菌能力与有效成分之间关系的研究鲜见报道。本研究以双面紫色、面绿背紫及双面绿色3种不同叶色紫苏叶为研究对象,以金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌作为受试菌株,采用微量稀释法接种,系统评价其抑菌活性,进一步结合偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA),探究叶色类型、化学成分与抑菌效力之间的关联性,以期为紫苏叶的质量控制与综合评估提供科学依据。

## 1 仪器与材料

### 1.1 主要仪器

XPE105型电子天平(瑞士梅特勒-托利多公司);KQ5200DE型超声波清洗器(昆山超声仪器有限公司);电热恒温水浴锅(天津市泰斯特仪器有限公司);SQ510C型高压灭菌器和INC821C型恒温培养箱(日本雅马拓公司);543600S型生物安全柜(美国Nuair公司);MS3basic涡旋振荡仪(德国IKA公司)。

### 1.2 主要药品与试剂

从紫苏叶栽培基地和药材市场收集两面紫色的紫苏叶(以下简称“PP”)、上表面绿色下表面紫色的紫苏叶(以下简称“GP”)及两面绿色的紫苏叶(以下简称“GG”)各10批,经中国食品药品检定研究院康帅副研究员鉴定为紫苏[*Perilla frutescens* (L.) Britt.]的干燥叶,具体信息见表1;0.9%无菌氯化钠溶液[华夏生生药业(北京)有限公司,批号:230519201];乙醇(国药集团化学试剂有限公司,批号:10009218);水为自制纯化水。

### 1.3 培养基及菌种

Mueller-Hinton (MH)肉汤(青岛高科技工业园海博生物技术有限公司,批号:20220312);

表1 紫苏叶样品信息

Table 1. Information of *Perilla Folium* sample

编号	品种	批号	收集地点
PP1	双面紫色	20220710	河北安国
PP2	双面紫色	20220705	河北安国
PP3	双面紫色	20220710	河北安国
PP4	双面紫色	20220810	河北安国
PP5	双面紫色	20220810	河北安国
PP6	双面紫色	20220825	河北安国
PP7	双面紫色	20220905	河北安国
PP8	双面紫色	20220905	河北安国
PP9	双面紫色	20230405	河北安国
PP10	双面紫色	20230405	河北安国
GP1	面绿背紫	20220710	重庆涪陵百胜镇
GP2	面绿背紫	20220807	重庆涪陵百胜镇
GP3	面绿背紫	20220705	重庆忠县汝溪镇
GP4	面绿背紫	20220810	重庆忠县汝溪镇
GP5	面绿背紫	20220810	重庆忠县汝溪镇
GP6	面绿背紫	20220805	重庆垫江
GP7	面绿背紫	20220822	重庆垫江
GP8	面绿背紫	20220825	重庆涪陵大顺镇
GP9	面绿背紫	20220905	重庆涪陵大顺镇
GP10	面绿背紫	20230505	广西玉林
GG1	双面绿色	20230410	重庆涪陵百胜镇
GG2	双面绿色	20230410	重庆忠县汝溪镇
GG3	双面绿色	20230410	重庆忠县汝溪镇
GG4	双面绿色	20230410	重庆忠县汝溪镇
GG5	双面绿色	20230410	重庆忠县汝溪镇
GG6	双面绿色	20230505	重庆涪陵大顺镇
GG7	双面绿色	20230505	重庆涪陵大顺镇
GG8	双面绿色	20230505	重庆涪陵大顺镇
GG9	双面绿色	20230505	甘肃庆阳
GG10	双面绿色	20230505	甘肃庆阳

胰蛋白胍大豆肉汤(tryptic soy broth, TSB)培养基(英国Oxoid公司,批号:3522609);金黄色葡萄球菌分别购自中国医学菌种保藏中心[编号:CMCC(B)26003]和美国典型培养物保藏中心(编号:ATCC6538);铜绿假单胞菌分别购自中国医学菌种保藏中心[编号:CMCC(B)10104]和美国典型培养物保藏中心(编号:ATCC9027)。

## 2 方法与结果

### 2.1 紫苏叶提取液的制备

分别取PP、GP、GG样品,粉碎后过三号筛,精密称取粉末5g,加入60%乙醇200mL,冰浴超声(功率:300W,频率:100kHz)提取

30 min, 滤过; 将滤液置于蒸发皿中, 40 °C水浴蒸至无醇味, 转移至刻度离心管中; 用少量纯化水多次洗涤蒸发皿, 洗涤液合并转移至同一离心管中, 加水定容至30 mL, 摇匀; 采用0.45 μm滤膜系统过滤除菌后, 用于后续抑菌实验。同法制备60%乙醇溶剂空白对照。经计算, 60%乙醇提取所得不同叶色紫苏叶提取物的原液质量浓度均为167 mg/mL (以生药量计)。

## 2.2 细菌的活化与培养

将金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌接种至10 mL TSB中, 于33 °C培养18~24 h; 取新鲜培养物, 用0.9%无菌氯化钠溶液稀释, 分别制成菌体浓度为 $5 \times 10^4$  CFU/mL (高浓度, H) 和 $5 \times 10^2$  CFU/mL (低浓度, L) 的菌悬液, 备用。

## 2.3 不同叶色紫苏叶对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌抑制能力的测定

采用微量稀释接种的方式测定不同叶色紫苏叶提取液对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的抑菌能力。每孔中加入 $2 \times$  MH培养基100 μL。于96孔板

首孔加入100 μL紫苏叶提取液, 使其初始浓度为83.5 mg/mL, 随后进行倍比稀释, 依次得到41.75、20.88、10.44、5.22 mg/mL的浓度梯度。每孔加入20 μL相应浓度的测试菌液。以提取试剂替代样品, 同法操作, 作得阳性对照; 以无菌水替代样品且不添加测试菌株, 同法操作, 作为阴性对照。将孔板置于30~35 °C的培养箱中培养24 h, 观察读数。采用SPSS14.1软件进行统计分析, 多组间比较采用单因素方差分析, 组间两两比较采用LSD-*t*检验, 以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2.4 紫苏叶对不同菌种最低抑菌浓度的影响

由表2可知, 紫苏叶醇提物对2株金黄色葡萄球菌的最低抑菌浓度 (minimum inhibitory concentration, MIC) 多低于10 mg/mL, 而对2株铜绿假单胞菌的MIC值多高于60 mg/mL。表明紫苏叶醇提物对金黄色葡萄球菌的抑菌活性明显优于铜绿假单胞菌, 同时样品叶色差异及实验条件对测定结果亦有较大影响。

表2 紫苏叶提取液对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的MIC结果 (mg/mL,  $n=30$ )

Table 2. MIC results of *Perilla Folium* extract against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa* (mg/mL,  $n=30$ )

菌种	菌株	均值	最大值	最小值
金黄色葡萄球菌	26003-H	8.77	20.88	5.22
	26003-L	5.08	10.44	2.61
	6538-H	6.73	16.70	2.61
	6538-L	4.92	10.44	2.61
铜绿假单胞菌	10104-H	112.03	167.00	41.75
	10104-L	59.49	167.00	20.88
	9027-H	93.94	167.00	20.88
	9027-L	66.80	167.00	20.88

## 2.5 不同叶色紫苏叶对金黄色葡萄球菌的抑菌活性分析

表3结果显示, 在高接种浓度条件下, 金黄色葡萄球菌的MIC值均高于低接种浓度组, 表明接种菌量对MIC测定结果具有显著影响。金黄色葡萄球菌作为临床常见条件致病菌, 其MIC测定应参照临床实验室标准化协会关于抗菌药物药敏试验的接种浓度要求, 即通常采用 $10^3 \sim 10^4$  cfu/孔的菌量, 该浓度范围更符合临床实际情况, 有助于提升结果的指导意义。本实验阳性对照均为阳性, 表明测试菌株活性良好; 阴性对照均为阴性, 表明试验过程未受到环境菌污染, 实验条件成立。

图1结果进一步表明, 不同叶色紫苏叶提取

液对金黄色葡萄球菌的MIC值存在一定差异, 部分组间比较差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ), 其标准差大小为: GP > PP > GG。RSD结果显示, GP组样品对金黄色葡萄球菌MIC值的批间波动较小, 说明该组样品在测试体系中稳定性良好, 化学成分批间差异较小。

基于上述分析结果, 不同叶色紫苏叶提取液对金黄色葡萄球菌的MIC值存在显著差异 ( $P < 0.01$ ), 结果见表4。PP、GP、GG醇提液的MIC均值由高至低依次为: GG > PP > GP, 表明其对金黄色葡萄球菌的抑菌能力强弱顺序为: GP > PP > GG。

## 2.6 不同叶色紫苏叶对铜绿假单胞菌的抑菌活性分析

实验结果表明, 与对金黄色葡萄球菌的抑菌效

表 3 不同叶色紫苏叶提取液对金黄色葡萄球菌的 MIC 分布 (n=10)

Table 3. Distribution of MIC values of *Perilla Folium* extract with different leaf colors against *Staphylococcus aureus* (n=10)

样本类别	菌株	MIC (mg/mL)						RSD (%)
		均值	中位数	最大值	75% 四分位数	25% 四分位数	最小值	
GG	26003-H	23.17	20.88	41.75	24.01	20.88	10.44	8.49
	26003-L	14.30	13.57	20.88	20.88	10.44	5.22	5.61
	6538-H	17.95	20.88	33.4	20.88	10.44	10.44	7.51
	6538-L	14.93	16.70	20.88	20.88	10.44	5.22	5.48
GP	26003-H	11.48	10.44	20.88	10.44	10.44	10.44	3.30
	26003-L	6.26	5.22	10.44	6.52	5.22	5.22	2.20
	6538-H	8.87	10.44	10.44	10.44	5.22	5.22	2.52
	6538-L	5.74	5.22	10.44	5.22	5.22	5.22	1.65
PP	26003-H	17.95	20.88	20.88	20.88	15.13	10.44	4.31
	26003-L	9.92	10.44	10.44	10.44	10.44	5.22	1.65
	6538-H	13.57	10.44	20.88	20.88	10.44	10.44	5.04
	6538-L	8.87	10.44	10.44	10.44	5.22	5.22	2.52

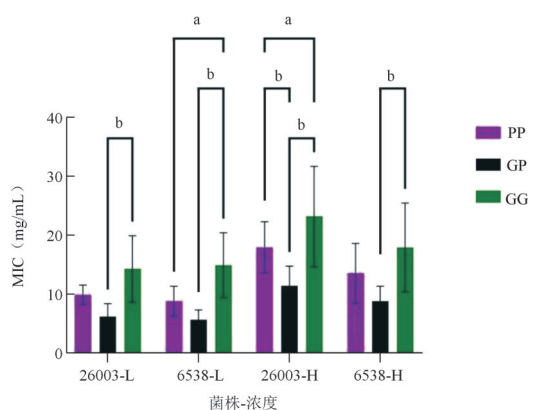


图 1 不同叶色紫苏叶提取液对金黄色葡萄球菌 MIC 比较 (n=10)

Figure 1. Comparison of MIC of *Perilla Folium* extract with different leaf colors against *Staphylococcus aureus* (n=10)

注: <sup>a</sup>P<0.05, <sup>b</sup>P<0.01。

表 4 不同“菌株-浓度”条件下紫苏叶提取液对金黄色葡萄球菌 MIC 值的差异分析

Table 4. Analysis of MIC differences of *Perilla Folium* extract against *Staphylococcus aureus* under different "strain-concentration" conditions

样品	菌株-浓度	F	P
PP、GP、GG	26003-H	10.128 2	0.000 5
	6538-H	7.019 8	0.003 5
	26003-L	12.439 9	0.000 1
	6538-L	16.724 2	0.000 1

注:  $F_{0.01(2,27)}=5.49$ 。

果相比,紫苏叶提取液对铜绿假单胞菌的抑菌活性显著降低,其较高 MIC 值表明该菌对提取液具有一定耐受性。在两株铜绿假单胞菌中,高接种浓度组的 MIC 值均普遍高于低浓度组,说明细菌接种浓度对 MIC 测定结果具有显著影响,具体见图 2。

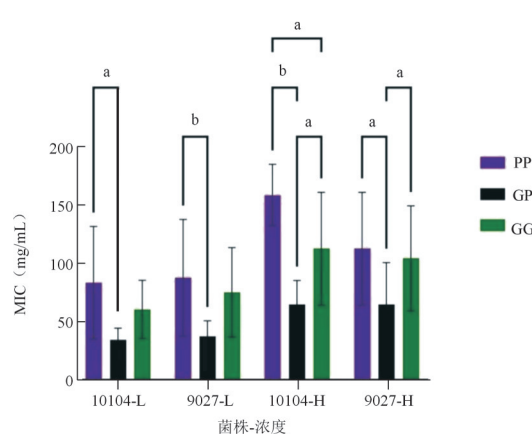


图 2 不同叶色紫苏叶提取液对铜绿假单胞菌 MIC 比较 (n=10)

Figure 2. Comparison of MIC of *Perilla Folium* extract with different leaf colors against *Pseudomonas aeruginosa* (n=10)

注: <sup>a</sup>P<0.05, <sup>b</sup>P<0.01。

从表 5 中也可看出,不同叶色紫苏叶的醇提取液对 2 株高浓度铜绿假单胞菌的 MIC 分布范围较宽,基本覆盖全部测试浓度梯度,且整体处于较高水平。同时,高浓度接种条件下的 MIC 值标准差普遍大于低浓度组,反映低浓度条件下的测试体系稳定性更佳。基于以上结果,建议适当减少微生物接种浓度,建议采用 100~1 000 cfu/孔的接种浓度进行铜绿假单胞菌的 MIC 测定。铜绿假单胞菌对抑菌环境表现出较强的抵抗能力,因此可作为评估紫苏醇提取液抗菌活性的代表性测试菌株,其测定结果对其他耐药菌株的研究具有一定参考价值。阴性对照和阳性对照结果同“2.5”项。

基于上述分析结果,不同叶色紫苏叶提取液对铜绿假单胞菌的 MIC 值存在显著差异 ( $P <$

表5 不同叶色紫苏叶提取液对铜绿假单胞菌的MIC分布 (n=10)

Table 5. Distribution of MIC values of *Perilla Folium* extract with different leaf colors against *Pseudomonas aeruginosa* (n=10)

样本类别	菌株	MIC (mg/mL)						RSD (%)
		均值	中位数	最大值	75%四分位数	25%四分位数	最小值	
GG	10104-H	158.65	167.00	167.00	167.00	167.00	83.50	26.41
	10104-L	83.50	83.50	167.00	104.38	41.75	41.75	48.21
	9027-H	112.73	83.50	167.00	167.00	83.50	41.75	48.41
	9027-L	87.68	83.50	167.00	135.69	41.75	41.75	49.98
GP	10104-H	64.71	73.06	83.50	83.50	41.75	41.75	20.76
	10104-L	34.44	41.75	41.75	41.75	20.88	20.88	9.90
	9027-H	64.71	52.19	125.25	93.94	41.75	20.88	36.09
	9027-L	37.58	41.75	62.63	41.75	20.88	20.88	13.20
PP	10104-H	112.73	83.50	167.00	167.00	83.50	41.75	48.41
	10104-L	60.54	62.63	83.50	83.50	41.75	20.88	24.99
	9027-H	104.38	83.50	167.00	167.00	83.50	41.75	45.10
	9027-L	75.15	83.50	167.00	83.50	41.75	41.75	38.37

0.05), 结果见表6。PP、GP、GG醇提液的MIC均值由高至低依次为PP > GG > GP, 表明其对铜绿假单胞菌的抑制能力强弱顺序为GP > GG > PP。

## 2.7 PLS-DA

PLS-DA是一种有监督的判别分析统计方法, 能够有效处理变量间多重共线性问题<sup>[12]</sup>, 有助于揭示不同叶色紫苏叶抑菌能力的特征差异成分。本研究首先对数据矩阵进行归一化预处理, 随后采用SIMCA 14.1软件对不同叶色紫苏叶各10批样品中金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的MIC, 结合本课题组前期测定的色数值, 以及花青素<sup>[1]</sup>、紫苏醛、迷迭香酸<sup>[13]</sup>的含量进行化学计量学分析。如图3所示, PLS-DA模型中成分1和成分2的贡献率分别为30.1%和31.5%。在该得分图中, PP样本聚集为一类, GP与GG紫苏叶样本虽有部分重叠, 但仍可明显区分为2类。PP、GP、GG在模型中的分布差异显著, 其拟合参数为 $R^2X=0.69$ 、 $R^2Y=0.797$ 。 $Q^2=0.665$ ,  $Q^2 > 0.4$ 说明该模型是可接受的, 稳定性符合要求(其中 $R^2X$ 和 $R^2Y$ 表示模型对自变量矩阵的解释能力,  $Q^2$ 表示模型的预测能力)。为进一步验证模型可靠性, 进行了200次置换检验, 得到 $R^2=0.195$ 、 $Q^2=-0.413$ , 由于 $Q^2$ 与Y轴交于负半轴, 说明该模型无过拟合的现象, 可用于不同处理组的判别分析<sup>[14]</sup>。

表6 不同“菌株-浓度”条件下紫苏叶提取液对铜绿假单胞菌MIC值的差异分析

Table 6. Analysis of MIC differences of *Perilla Folium* extract against *Pseudomonas aeruginosa* under different "strain-concentration" conditions

样品	菌株-浓度	F	P
PP、GP、GG	10104-H	19.066 9	<0.000 1
	9027-H	3.475 7	0.045 4
	10104-L	5.932 1	0.007 3
	9027-L	4.920 6	0.015 1

注:  $F_{0.05}(2,27)=3.35$ ;  $F_{0.01}(2,27)=5.49$ 。

## 2.8 潜在标志差异物

在PLS-DA分析中, 每个标志物均可获得一个变量重要性投影(variable importance in projection, VIP)值, 用于衡量该变量在区分组间差异中的贡献程度。通常认为,  $VIP > 1$ 表示该变量具有重要判别作用, 且VIP值越大, 其贡献越显著, 表明该变量在不同处理组间的差异越明显。因此,  $VIP > 1$ 常被用作筛选差异性标志物的标准<sup>[15]</sup>。花青素、R值、b\*值、E\*ab值、10104-H、6538-L、L\*值、紫苏醛、26003-L 9个指标性标志物的VIP值分别为1.41、1.37、1.24、1.12、1.11、

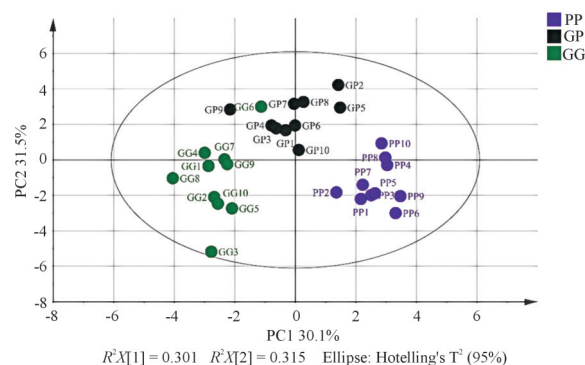


图3 不同叶色紫苏叶对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌MIC、花青素、紫苏醛、迷迭香酸含量及色数值的PLS-DA得分图

Figure 3. PLS-DA score plot of MIC against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*, anthocyanin, perillaldehyde, and rosmarinic acid contents, and color values in *Perilla Folium* with different leaf colors

1.08、1.08、1.08 和 1.00，均达到大于 1 的阈值，表明这些标志物在 PP、GP、GG 3 组间的差异具有统计学意义，是区分不同叶色紫苏叶的关键性指标。

### 2.9 Person 相关性分析

采用 Origin 2012 软件对紫苏叶中花青素<sup>[1]</sup>、紫苏醛、迷迭香酸<sup>[13]</sup>的含量及叶色值<sup>[1]</sup>与金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌的 MIC 值进行 Pearson 相关性分析。图 4 结果显示：26003-H、26003-L 与迷迭香酸呈中等负相关 ( $P < 0.01$ )，6538-H 与

迷迭香酸呈负相关 ( $P < 0.05$ )，6538-L 与迷迭香酸呈极显著负相关 ( $P < 0.001$ )，10104-H 与紫苏醛、迷迭香酸呈负相关 ( $P < 0.05$ )，10104-L 与紫苏醛呈负相关 ( $P < 0.05$ )，9027-H 与迷迭香酸呈负相关 ( $P < 0.05$ )，9027-L 与紫苏醛呈负相关 ( $P < 0.05$ )。综合分析表明，说明迷迭香酸的含量与金黄色葡萄球菌的 MIC 密切相关，同时迷迭香酸、紫苏醛的含量与铜绿假单胞菌的 MIC 也密切相关。因此，迷迭香酸、紫苏醛的含量可以作为评价不同叶色紫苏叶抑菌活性的指标。

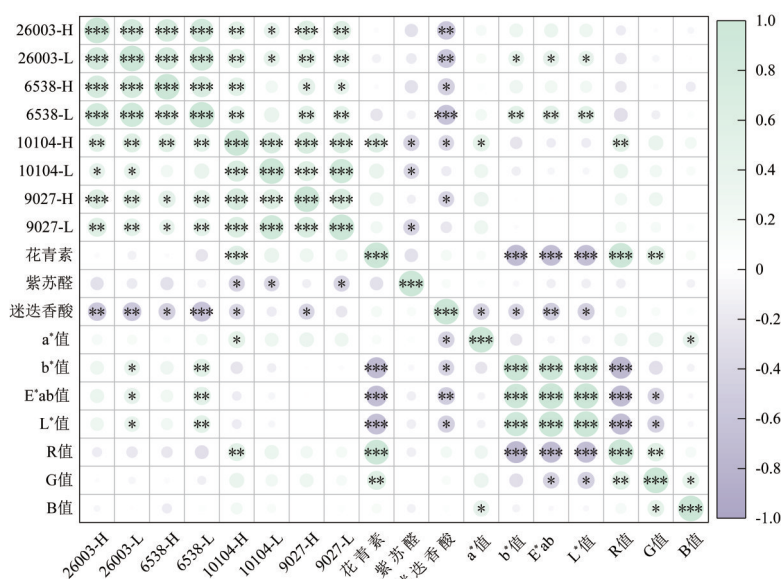


图 4 不同叶色紫苏叶对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的 MIC 及其与花青素、紫苏醛、迷迭香酸含量及色数值的相关性分析

Figure 4. Correlation analysis of MIC against *Staphylococcus aureus* and *Pseudomonas aeruginosa*, anthocyanin, perillaldehyde, and rosmarinic acid contents, and color values in *Perilla Folium* with different leaf colors

注：\* $P \leq 0.05$ , \*\* $P \leq 0.01$ , \*\*\* $P \leq 0.001$ 。

### 3 讨论

本研究采用微量稀释法系统评价了 PP、GP、GG 的抑菌活性，并结合叶色值和化学成分分析，揭示了其抑菌能力与表型特征及化学组成之间的相关性。研究结果为不同叶色紫苏叶的抑菌作用差异提供了科学依据，并从现代药理学角度为其传统功效提供了新的解释视角。

在本研究中，首先依据叶色差异将紫苏叶按照叶色分为 PP、GP、GG 3 类。在前期研究获得的化学成分含量及色数值的基础上，进一步测定其抑菌活性，构建“叶色-化学成分-活性”的数据矩阵。从抑菌活性来看，GP 对金黄色葡萄球菌的抑菌能力最强，PP 次之，GG 最弱。GP 叶片背

面紫色、正面绿色，其抑菌活性在三者中最强，提示叶色特征与抑菌能力之间存在关联，可能源于不同叶色紫苏叶中活性成分的组成和含量差异。

通过 PLS-DA 和相关性分析，系统研究了 2 株金黄色葡萄球菌和 2 株铜绿假单胞菌的 MIC 值与紫苏叶色参数及化学成分的关联性。分别对不同接种浓度下菌株的 MIC 值、叶色参数及化学成分进行 PLS-DA 建模与 Pearson 相关性分析，结果显示，在较高和较低接种浓度下，紫苏叶提取液对金黄色葡萄球菌与铜绿假单胞菌均表现出更强的抑菌活性。不同叶色紫苏叶对金黄色葡萄球菌的抑菌能力的强弱顺序为：GP > PP > GG，对铜绿假单胞菌的抑菌能力强弱为：GP > GG > PP。通过 PLS-DA 分析，共筛选出 9 个关键标志物，

包括花青素、R值、b值、E\*ab值、10104-H、6538-L、L\*值、紫苏醛和26003-L。提示叶色参数不仅可用于紫苏叶表型的快速判别，还可能间接反映其抑菌潜力。这一结果为中药“辨色论质”的传统经验提供了现代数据支持，即叶色差异背后对应着化学成分和生物活性的系统性差异。迷迭香酸与金黄色葡萄球菌的MIC呈负相关，紫苏醛、迷迭香酸与铜绿假单胞菌的MIC呈负相关，说明这两种成分分别是抑制革兰阳性菌和革兰阴性菌的关键活性物质。这一发现从化学成分角度解释了不同叶色紫苏叶抑菌能力差异的内在原因。

## 参考文献

- 1 聂黎行, 王馨平, 康帅, 等. 紫苏叶和白苏叶叶色数字化表征及与花青素含量相关性研究[J]. 中国医院药学杂志, 2024, 44(21): 2477-2483. [Nie LX, Wang XP, Kang S, et al. Digital characterization of color of perilla leaf and white perilla leaf and correlation with contents of anthocyanin[J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy, 2024, 44(21): 2477-2483.] DOI: 10.13286/j.1001-5213.2024.21.07.
- 2 宋·苏颂, 编撰. 本草图经[M]. 福州: 福建科技出版社, 1988: 579-580.
- 3 南北朝·陶弘景, 编撰. 尚志钧, 尚元胜, 辑校. 本草经集注[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1994: 484, 490.
- 4 宋宇. 历史时期紫苏的种植与利用研究[J]. 信阳农林学院学报, 2020, 30(4): 101-105, 109. [Song Y. Research on the planting and utilization of perilla in historical period[J]. Journal of Xinyang Agricultural College, 2020, 30(4): 101-105, 109.] <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/CiBQZXJpb2RpY2FsQ0hJU29sejkyMDI2MDYwMjE2MjUxORIVeHlueWdkemt4eHhiMjAyMDA0MDIzGghmZWw3dGNmaw%3D%3D>.
- 5 中国药典2025年版. 一部[S]. 2025: 354.
- 6 广东省药品监督管理局, 著. 广东省中药材标准, 第三册[M]. 广州: 广东科学技术出版社, 2019: 174-176.
- 7 段江莲, 李琴, 李为琴, 等. 紫苏甲醇提取物的体外抗氧化及抑菌活性研究[J]. 实验室科学, 2014, 17(2): 8-11. [Duan JL, Li Q, Li WQ, et al. Study on *in vitro* antioxidant and antimicrobial activities of methanol extract from *Perilla frutescens* L.[J]. Laboratory Science, 2014, 17(2): 8-11.] DOI: 10.3969/j.issn.1672-4305.2014.02.003.
- 8 李璐炫, 邓榕榕, 郑诗倩, 等. 紫苏叶油对鸡大肠杆菌的抗菌活性及生物被膜形成的抑制作用[J]. 中草药, 2025, 56(8): 2840-2848. [Li LX, Deng RR, Zheng SQ, et al. Antibacterial activity of oil from *Perillae Folium* against avian pathogenic *Escherichia coli* and its inhibitory effect on biofilm formation[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2025, 56(8): 2840-2848.] <https://d.wanfangdata.com.cn/periodical/CiBQZXJpb2RpY2FsQ0hJU29sejkyMDI2MDYwMjE2MjUxORIMemN5MjAyNTA4MDE5GghkeHE5bjZlZg%3D%3D>.
- 9 魏磊, 李晓, 王学方, 等. 紫苏叶总三萜超声提取工艺优化及对10种常见致病菌的抑菌作用研究[J]. 中国药房, 2018, 29(16): 2193-2197. [Wei L, Li X, Wang XF, et al. Optimization of the ultrasonic extraction technology of total triterpenoids from the leaves of *Perilla frutescens* and study on its antibacterial activities against 10 kinds of common pathogens[J]. China Pharmacy, 2018, 29(16): 2193-2197.] DOI: 10.6039/j.issn.1001-0408.2018.16.08.
- 10 周潇, 李康银, 李佳, 等. 紫苏提取物的挥发性成分及抑菌活性研究[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(9): 38-44. [Zhou X, Li KY, Li J, et al. Study on volatile components and antibacterial activity of *Perilla frutescens* extract[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(9): 38-44.] DOI: 10.3969/j.issn.1007-7731.2023.09.009.
- 11 闫小杰, 白乌日力嘎, 张园园, 等. 紫苏叶醇提物提取工艺及其抗氧化、抗菌活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(3): 9-18. [Yan XJ, Bai WRLG, Zhang YY, et al. Study on extraction process of ethanol extract from *Perilla frutescens* leaves and its antioxidant and antibacterial activities[J]. China Food Additives, 2025, 36(3): 9-18.] [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7jvqSX1a2LVRQ6aHg043CkX3\\_cbxVdFsqYfKQXYnHkUEhaUdAmifSZ17tvZ9\\_X73k5zFMs0pGFw60jKtYReHm2MC81ZAMaJ9bb37vBCXY3t12E-8ywy6B\\_vKARmPQ0DmgTIFbMURbuSkNOB-8aGaxoV7H3cRKFpbgQfBhY536o3X7QEyzg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7jvqSX1a2LVRQ6aHg043CkX3_cbxVdFsqYfKQXYnHkUEhaUdAmifSZ17tvZ9_X73k5zFMs0pGFw60jKtYReHm2MC81ZAMaJ9bb37vBCXY3t12E-8ywy6B_vKARmPQ0DmgTIFbMURbuSkNOB-8aGaxoV7H3cRKFpbgQfBhY536o3X7QEyzg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- 12 程超, 夏兰欣, 杜芬妮, 等. 基于9种风味物质的利川红SPME优化及PLS-DA风味识别[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 215-222. [Cheng C, Xia LX, Du FN, et al. Optimization of solid phase microextraction for GC-MS analysis of nine flavor compounds in Lichuan Hong tea and flavor discrimination by partial least squares-discriminant analysis[J]. Food Science, 2021, 42(6): 215-222.] DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20200324-353.
- 13 聂黎行, 黄烈岩, 王馨平, 等. 基于超高效合相色谱法的紫苏叶和白苏叶快速定性与定量分析[J]. 中国新药杂志, 2025, 34(13): 1417-1424. [Nie LX, Huang LY, Wang XP, et al. Rapid qualitative and quantitative analysis of perilla leaf and white perilla leaf based on an ultra-high performance convergence chromatography[J]. Chinese Journal of New Drugs, 2025, 34(13): 1417-1424.] DOI: 10.20251/j.cnki.1003-3734.2025.13.011.
- 14 徐攀, 贾鑫, 高鹏, 等. 基于正交偏最小二乘判别分析电子束辐照对黄精抗氧化活性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 274-282. [Xu P, Jia X, Gao P, et al. Analysis of the effect of electron beam irradiation on antioxidant activity of *Polygonati rhizoma* based on orthogonal partial least squares-discriminant[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(12): 274-282.] <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotol-SPAJ202312031.htm>.
- 15 Liu HC, Wen J, Xu YJ, et al. Evaluation of dynamic changes and formation regularity in volatile flavor compounds in *Citrus reticulata* 'chachi' peel at different collection periods using gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Lwt, 2022, 171: 114126. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.114126.

收稿日期: 2025年12月30日 修回日期: 2026年04月03日  
本文编辑: 钟巧妮 沈静怡