

杉木不同无性系鲜枝叶精油得率及抑菌活性的季节差异

高隆辉^{1,2}, 伍观娣², 苏艳¹, 黄荣², 王润辉², 韦如萍², 晏姝², 郑会全^{2,①}

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州 510642;

2. 广东省林业科学研究院 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东 广州 510520)

摘要: 为揭示不同无性系杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)鲜枝叶精油得率及抑菌活性的变异特征并筛选出优良无性系,以广东杉木第3代育种园中88个核心无性系为研究对象,比较分析了不同杉木无性系鲜枝叶精油的得率及其对大肠杆菌(*Escherichia coli*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)抑制率的季节差异,采用群体均值四分法进行优良无性系筛选,并对筛选结果进行主成分分析验证,对精油得率与抑菌率进行Pearson相关性分析。结果表明:各季节的精油得率及精油对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌抑制率的变异系数分别为30.68%~41.20%、41.73%~102.64%、113.80%~299.96%,在不同无性系间差异极显著($P<0.01$),重复力均高于0.7,且多在0.9以上。夏季精油得率最高,但与其他季节的差异并不显著;夏季精油对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率均最高,并且,夏季精油对大肠杆菌的抑制率显著($P<0.05$)高于春季和冬季,对金黄色葡萄球菌的抑制率显著高于秋季和冬季。基于精油得率及精油对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率,在春、夏、秋、冬季分别筛选出15、9、11、8个优良无性系,其中,无性系cx79在4个季节均表现优异。相关性分析结果显示:精油得率与抑菌率的相关系数存在明显的季节差异,其中,春季精油得率与抑菌率的相关性最强。综合分析认为,供试杉木核心无性系的鲜枝叶精油得率及抑菌活性变异较大,总体上存在明显的季节性差异和无性系间差异;cx79为最优无性系,可作为杉木精油应用及专用型品种的优良候选材料。

关键词: 杉木; 核心无性系; 精油得率; 抑菌率; 群体均值四分法

中图分类号: Q946.85; Q948.12⁺2.3; S791.27.08 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2026)02-0077-07
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2026.02.08

Seasonal differences in yield and antibacterial activity of essential oil from fresh branches and leaves of different *Cunninghamia lanceolata* clones GAO Longhui^{1,2}, WU Guandi², SU Yan¹, HUANG Rong², WANG Runhui², WEI Ruping², YAN Shu², ZHENG Huiquan^{2,①} (1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2026, 35(2): 77-83, 93

Abstract: To reveal the variation characteristics of yield and antibacterial activity of essential oil from fresh branches and leaves of different *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. clones and screen superior clones, 88 core clones from the third-generation breeding garden of *C. lanceolata* in Guangdong were taken as research objects, the seasonal differences in yield of essential oil from fresh branches and leaves of different *C. lanceolata* clones and its inhibition rates against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* were compared and analyzed, the superior clones were screened by using the population mean quadrat method, the screening results were validated by using principal component analysis, and Pearson correlation analysis was conducted between yield and inhibition rate of essential oil. The results show that

收稿日期: 2025-10-09

基金项目: 广东省林业局绿美广东生态建设重点任务保障专项(粤林函[2023]245号;粤财资环[2025]16号)

作者简介: 高隆辉(2001—),男,广东韶关人,硕士研究生,主要从事林木生理生态方面的研究工作。

①通信作者 E-mail: zhenghq@sinogaf.cn

引用格式: 高隆辉, 伍观娣, 苏艳, 等. 杉木不同无性系鲜枝叶精油得率及抑菌活性的季节差异[J]. 植物资源与环境学报, 2026, 35(2): 77-83, 93.

the coefficients of variation of yield of essential oil and inhibition rates of essential oil against *E. coli* and *S. aureus* in each season are 30.68% – 41.20%, 41.73% – 102.64%, and 113.80% – 299.96%, respectively. There are extremely significant differences ($P < 0.01$) among clones, with repeatability values all greater than 0.7, mostly above 0.9. The yield of essential oil is the highest in summer, but the difference is not significant compared with the other seasons. While the inhibition rates of essential oil against *E. coli* and *S. aureus* are both the highest in summer. In addition, the inhibition rate of essential oil against *E. coli* in summer is significantly ($P < 0.05$) higher than those in spring and winter, and that against *S. aureus* is significantly higher than those in autumn and winter. Based on yield of essential oil and inhibition rates of essential oil against *E. coli* and *S. aureus*, 15, 9, 11, and 8 superior clones are screened in spring, summer, autumn, and winter, respectively, among which, clone cx79 exhibits excellent performance in the four seasons. The correlation analysis result reveals that there are striking seasonal variations in correlation coefficients between yield and antibacterial rate of essential oil, among which, the correlation between yield and antibacterial rate of essential oil in spring is the strongest. The comprehensive analysis indicates that the variations of yield and antibacterial activity of essential oil from fresh branches and leaves of test *C. lanceolata* core clones are relatively large, and there are pronounced seasonal and clonal differences in general. cx79 is identified as the optimal clone. It represents an excellent candidate material for essential oil application and specialized cultivar development of *C. lanceolata*.

Key words: *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.; core clone; yield of essential oil; antibacterial rate; population mean quadrat method

植物精油为通过蒸馏或萃取等多种方式从植物叶片、种子、果实、表皮等器官或组织中获得具有挥发性的芳香化合物^[1]。相关研究结果显示:植物精油在抑菌、抗氧化、抗肿瘤和缓解神经紧张等方面具有重要的应用价值^[2-5]。大肠杆菌(*Escherichia coli*)与金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)是常见的食源性致病菌^[6],对多种抗生素表现出高度的耐药性^[7-8]。植物精油能够缓解病原微生物的抗生素耐药性^[9],并且,随着人们健康与环保意识的不断增强以及对生活质量要求的不断提高,人们越来越青睐用植物精油作天然抑菌剂^[10]。

杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]为中国亚热带地区一种主要的速生用材和生态造林树种,迄今已有3 000多年的栽培和应用历史^[11-12]。研究发现,杉木精油抑菌活性良好,能有效抑制多种细菌的生长,具备用作天然植物抑菌剂的开发潜力^[13],尤其对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等细菌具有较强的抑制作用^[14]。从杉木采伐和加工过程中产生的大量废料以及可再生鲜枝叶中提取精油并开发利用^[15-16],是实现杉木资源高值化利用的重要方向。尽管已有研究探讨了杉木不同部位或少数品种间的精油得率与功能活性,但针对较大规模种质资源的杉木鲜枝叶精油得率与抑菌率的变异特征及内在关联仍有待深入研究。

鉴于此,以广东杉木第3代育种群体中88个核心无性系的鲜枝叶为材料,对不同无性系在4个季节的精油得率及精油对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率进行比较分析,采用群体均值四分法进行无性系筛选,在此基础上进行主成分分析和Pearson相关性分析,旨在揭示杉木不同无性系在精油得率与抑菌活性方面的差异,并筛选出优良无性系,为杉木精油专用型品种的选育和应用提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为广东省韶关市曲江区国有小坑林场杉木第3代育种园(北纬24°42′、东经113°48′,海拔303 m,年平均气温20.3℃,年积温6 529.4℃,年均降水量1 530 mm,霜期约15 d)中88个核心无性系的鲜枝叶。其中,第1代种质有56个无性系,编号分别为cx26、cx27、cx67、cx71、cx74、cx79、cx80、cx100、cx180、cx231、cx232、cx233、cx240、cx241、cx242、cx245、cx246、cx249、cx250、cx251、cx255、cx258、cx262、cx263、cx265、cx266、cx269、cx270、cx271、cx300、cx310、cx370、cx390、cx420、cx484、cx509、cx528、cx529、cx534、cx538、cx539、cx546、cx548、cx552、cx554、cx556、cx653、cx765、cx770、cx785、cx816、cx817、cx818、cx820、cx826、cx828;第2代种质

有 12 个无性系, 编号分别为 cx63、cx66、cx567、cx569、cx570、cx571、cx831、cx835、cx836、cx863、cx866、cx867; 第 3 代种质有 20 个无性系, 编号分别为 cx837、cx838、cx839、cx840、cx841、cx845、cx846、cx852、cx853、cx854、cx859、cx860、cx861、cx865、cx868、cx869、cx871、cx873、cx874、cx876。所有无性系均为 2017 年的嫁接植株[砧木为林场内 2.5 代种子园粤 S-CSD(2.5)-CL-001-2023 的 2 年生实生苗], 每个无性系有 5~10 个分株。同一无性系的分株连续排布, 不同无性系随机排布, 株距和行距均为 4 m。88 个核心无性系的胸径、树高、冠幅等信息见文献[17]。

大肠杆菌和金黄色葡萄球菌来自广东省微生物菌种保藏中心, 菌株编号分别为 GDMCC 1.1917 和 GDMCC 1.2442。

1.2 方法

1.2.1 枝叶采集与精油提取 于 2023 年 3 月(春)、6 月(夏)、9 月(秋)、12 月(冬), 在各无性系中随机选取 5 株健康分株, 在树冠的上、中、下层和不同方位均衡采集成熟叶片及其着生枝条, 每株采集约 1 kg, 同株枝叶混匀后, 立即真空包装并置于-40 °C 冰箱中保存、备用。

采用水蒸馏法^[18]提取杉木各无性系的鲜枝叶精油。用切草机将鲜枝叶切碎; 取 300 g 碎样, 按照料液比 8:1 加入去离子水, 混匀后, 于 380 °C 蒸馏提取 6 h; 收集蒸馏产物, 在通风橱中使用乙醚重复洗刷冷凝管 3 次, 合并清洗液与蒸馏产物, 静置 5 min; 待分层后, 吸出水层, 将油层置于通风橱中挥发 8 h, 产物即精油。每个无性系重复取样提取 3 次。按照公式“ $w = (m_e/m_f) \times 100\%$ ”计算精油得率(w), 式中, m_e 为精油质量, m_f 为鲜枝叶质量。

1.2.2 抑菌活性测定 采用 1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液将牛肉膏蛋白胨液体培养基^[19]的酸碱度调为 pH 7.2 至 pH 7.4, 分别加入 10 μL 约 1×10⁶ CFU·mL⁻¹ 的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌溶液, 混匀后, 加入精油, 使精油的最终体积分数达到 10 μL·mL⁻¹, 在 37 °C 下 120 r·min⁻¹ 振荡培养 24 h(溶液呈乳白色)。培养结束后, 向 96 孔酶标板中加入 200 μL 培养液, 采用 Spectra Max M2 酶标仪(美国 Molecular Devices 公司)在 600 nm 处测定 OD 值。以无菌水为空白对照, 每个无性系重复取样检测 3 次。根据检测结果计算抑菌率^[20]。

1.3 数据处理与统计分析

采用 EXCEL 2019 软件统计不同季节精油得率和抑菌率的最小值、最大值、平均值、标准差、变异系数; 采用 R 4.4.2 软件对不同季节精油得率和抑菌率进行方差分析(分析前, 对精油得率和抑菌率数据进行反正弦转换^[21])和重复力计算^[22]。以群体平均值为标准, 采用四分法进行无性系筛选, 并采用 R 4.4.2 软件进行主成分分析。采用 R 4.4.2 软件对不同季节精油得率与抑菌率进行 Pearson 相关性分析。使用 Origin 2024 软件绘图。

2 结果和分析

2.1 杉木不同无性系鲜枝叶精油得率的季节差异

对不同季节杉木 88 个核心无性系鲜枝叶的精油得率进行统计分析, 结果(表 1)表明: 从 F 值看, 同一季节不同无性系之间的精油得率均存在极显著差异($P < 0.01$)。夏季精油得率最高, 但各季节间的精油得率差异并不显著; 精油得率的变异系数从春季到冬季表现为逐渐降低。春季精油得率的变异系数最大(41.20%), 变幅也最大, 最大值为最小值的 9.2 倍; 夏季精油得率的变异系数相对较大, 为 36.29%, 变幅也相对较大, 最大值为最小值的 8.6 倍; 秋季精油得率的变异系数相对较小, 为 34.89%, 变幅也相对较小, 最大值为最小值的 6.6 倍; 冬季精油得率的变异系数最小, 为 30.68%, 变幅也最小, 最大值为最小值的 4.9 倍。4 个季节精油得率的重复力均高于 0.9, 说

表 1 杉木 88 个核心无性系鲜枝叶精油得率的季节差异分析¹⁾
Table 1 Analysis of seasonal variation in yield of essential oil from fresh branches and leaves of 88 core clones of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.¹⁾

统计量 Statistic	不同季节精油得率/% Yield of essential oil in different seasons			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
最小值 Minimum	0.028	0.017	0.026	0.028
最大值 Maximum	0.257	0.147	0.172	0.138
平均值 Mean	0.081a	0.085a	0.084a	0.079a
SD	0.033	0.031	0.029	0.024
CV/%	41.20	36.29	34.89	30.68
F 值 F value	11.45 **	23.03 **	10.43 **	23.77 **
重复力 Repeatability	0.91	0.96	0.90	0.96

¹⁾ SD: 标准差 Standard deviation; CV: 变异系数 Coefficient of variation. 同行中不同小写字母表示在不同季节间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different seasons. **: $P < 0.01$.

明供试杉木无性系鲜枝叶精油得率在不同季节均受到较强的遗传调控,为进一步筛选杉木无性系提供了重要依据。

2.2 杉木不同无性系鲜枝叶精油抑菌率的季节差异

对不同季节杉木 88 个核心无性系鲜枝叶精油对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制活性进行统计分析,结果(表 2)显示:从 F 值看,精油对 2 种细菌的抑制率在各个季节的不同无性系间均存在极显著差异 ($P < 0.01$)。从春季到冬季,精油对 2 种细菌的抑制率均表现为先升高后降低,且峰值均出现在夏季,谷值均出现在冬季。从精油对大肠杆菌的抑制率看,夏季与秋季、春季与冬季间的差异均不显著,但夏季和秋季显著 ($P < 0.05$) 高于春季和冬季;春季的变异系数最大 (102.64%), 变幅相对较大 (0.00% ~ 88.50%);

夏季的变异系数 (56.24%) 和变幅 (6.49% ~ 87.14%) 均略低于秋季;秋季的变异系数相对较大 (57.28%), 变幅最大 (0.00% ~ 98.80%); 冬季的变异系数 (41.73%) 和变幅 (2.32% ~ 47.69%) 均最小。从精油对金黄色葡萄球菌的抑制率看,春季与夏季间的差异不显著,但二者显著高于秋季和冬季;各季节的变异系数和变幅均很大,变异系数为 113.80% ~ 299.96%, 最大变幅为 0.00% ~ 100.00%。春季和冬季精油对大肠杆菌的抑制率的重复力分别为 0.89 和 0.71,夏季和秋季精油对大肠杆菌的抑制率的重复力以及 4 个季节精油对金黄色葡萄球菌的抑制率的重复力均大于 0.9,说明供试杉木无性系鲜枝叶精油的抑菌活性受到较强的遗传因素影响,基于季节性抑菌活性差异开展杉木优良无性系筛选具有较高的可行性。

表 2 杉木 88 个无性系鲜枝叶精油抑菌率的季节差异分析¹⁾

Table 2 Analysis of seasonal variation in antibacterial rate of essential oil from fresh branches and leaves of 88 clones of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.¹⁾

统计量 Statistic	不同季节精油对大肠杆菌的抑制率/% Inhibition rate of essential oil against <i>Escherichia coli</i> in different seasons				不同季节精油对金黄色葡萄球菌的抑制率/% Inhibition rate of essential oil against <i>Staphylococcus aureus</i> in different seasons			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
最小值 Minimum	0.00	6.49	0.00	2.32	0.00	0.00	0.00	0.00
最大值 Maximum	88.50	87.14	98.80	47.69	97.33	99.19	100.00	96.00
平均值 Mean	21.00b	31.99a	29.49a	20.79b	25.64a	27.60a	14.14b	6.22b
标准差 Standard deviation	2.29	1.92	1.80	0.92	3.72	3.34	2.84	1.98
变异系数/% Coefficient of variation	102.64	56.24	57.28	41.73	136.19	113.80	188.99	299.96
F 值 F value	9.38 **	15.12 **	15.60 **	3.50 **	34.96 **	30.68 **	47.88 **	29.18 **
重复力 Repeatability	0.89	0.93	0.94	0.71	0.97	0.97	0.98	0.97

¹⁾ 同行中不同小写字母表示在不同季节间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different seasons. **: $P < 0.01$.

2.3 杉木优良无性系的筛选

2.3.1 群体均值四分法筛选结果 为筛选兼具高精油得率与抑菌活性的杉木优良无性系,采用群体均值四分法对供试 88 个无性系进行筛选,结果见图 1。

春季,精油得率及精油对大肠杆菌的抑制率均高于均值的优良无性系有 19 个,分别为 cx71、cx79、cx231、cx233、cx242、cx250、cx255、cx262、cx266、cx271、cx370、cx420、cx556、cx770、cx785、cx817、cx818、cx845、cx854;夏季,精油得率及精油对大肠杆菌的抑制率均高于均值的优良无性系有 17 个,分别为 cx79、cx231、cx232、cx245、cx255、cx263、cx266、cx270、cx271、cx300、cx528、cx570、cx765、cx785、cx828、cx845、cx846;秋季,精油得率及精油对大肠杆

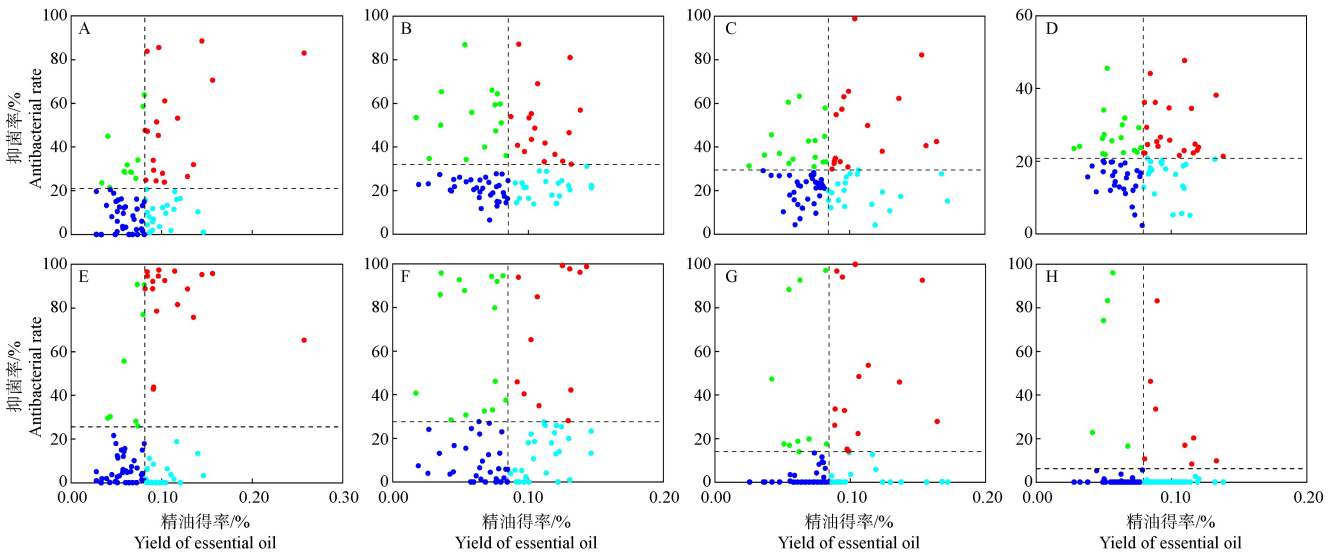
菌的抑制率均高于均值的优良无性系有 17 个,分别为 cx79、cx231、cx232、cx539、cx556、cx570、cx571、cx845、cx846、cx852、cx859、cx860、cx861、cx863、cx865、cx869、cx874;冬季,精油得率及精油对大肠杆菌的抑制率均高于均值的优良无性系有 22 个,分别为 cx27、cx63、cx67、cx71、cx74、cx79、cx241、cx245、cx246、cx255、cx546、cx548、cx556、cx570、cx653、cx817、cx835、cx836、cx845、cx860、cx867、cx874。

春季,精油得率及精油对金黄色葡萄球菌的抑制率均高于均值的优良无性系有 18 个,即 cx71、cx79、cx180、cx242、cx250、cx255、cx262、cx266、cx271、cx300、cx370、cx420、cx556、cx770、cx785、cx817、cx818、cx826;夏季,精油得率及精油对金黄色葡萄球

菌的抑制率均高于均值的优良无性系有 12 个, 即 cx79、cx231、cx232、cx266、cx271、cx300、cx571、cx785、cx816、cx845、cx846、cx869; 秋季, 精油得率及精油对金黄色葡萄球菌的抑制率均高于均值的优良无性系有 14 个, 即 cx79、cx232、cx265、cx420、cx554、cx556、cx570、cx571、cx845、cx846、cx860、cx865、cx869、cx874; 冬季精油得率及精油对金黄色葡萄球菌的抑制率均高于均值的优良无性系有 8 个, 即 cx63、cx71、cx79、cx570、cx817、cx845、cx860、cx867。

经过进一步统计, 春季精油得率及精油对 2 种细菌的抑制率均高于均值的无性系有 15 个, 分别为 cx71、cx79、cx242、cx250、cx255、cx262、cx266、cx271、

cx370、cx420、cx556、cx770、cx785、cx817、cx818、cx820; 夏季精油得率及精油对 2 种细菌的抑制率均高于均值的无性系有 9 个, 分别为 cx79、cx231、cx232、cx266、cx271、cx300、cx785、cx845、cx846; 秋季精油得率及精油对 2 种细菌的抑制率均高于均值的无性系有 11 个, 分别为 cx79、cx232、cx556、cx570、cx571、cx845、cx846、cx860、cx865、cx869、cx874; 冬季精油得率及精油对 2 种细菌的抑制率均高于均值的无性系有 8 个, 分别为 cx63、cx71、cx79、cx570、cx817、cx845、cx860、cx867。值得注意的是, cx79 的鲜枝叶精油得率及精油对 2 种细菌的抑制率在 4 个季节内均表现突出。



虚线示均值 The dashed lines represent the means. ●: 精油得率和抑菌率均高于均值的无性系 Clones with both yield and antibacterial rate of essential oil higher than the mean; ●: 精油得率高于均值、抑菌率低于均值的无性系 Clones with yield of essential oil higher than the mean and antibacterial rate lower than the mean; ●: 精油得率和抑菌率均低于均值的无性系 Clones with both yield and antibacterial rate of essential oil lower than the mean; ●: 精油得率低于均值、抑菌率高于均值的无性系 Clones with yield of essential oil lower than the mean and antibacterial rate higher than the mean.

A, B, C, D. 基于不同季节精油得率及精油对大肠杆菌抑制率的筛选结果 Selection results based on yield of essential oil and inhibition rate of essential oil against *Escherichia coli* in different seasons; A. 春季 Spring; B. 夏季 Summer; C. 秋季 Autumn; D. 冬季 Winter. E, F, G, H. 基于不同季节精油得率及精油对金黄色葡萄球菌抑制率的筛选结果 Selection results based on yield of essential oil and inhibition rate of essential oil against *Staphylococcus aureus* in different seasons; E. 春季 Spring; F. 夏季 Summer; G. 秋季 Autumn; H. 冬季 Winter.

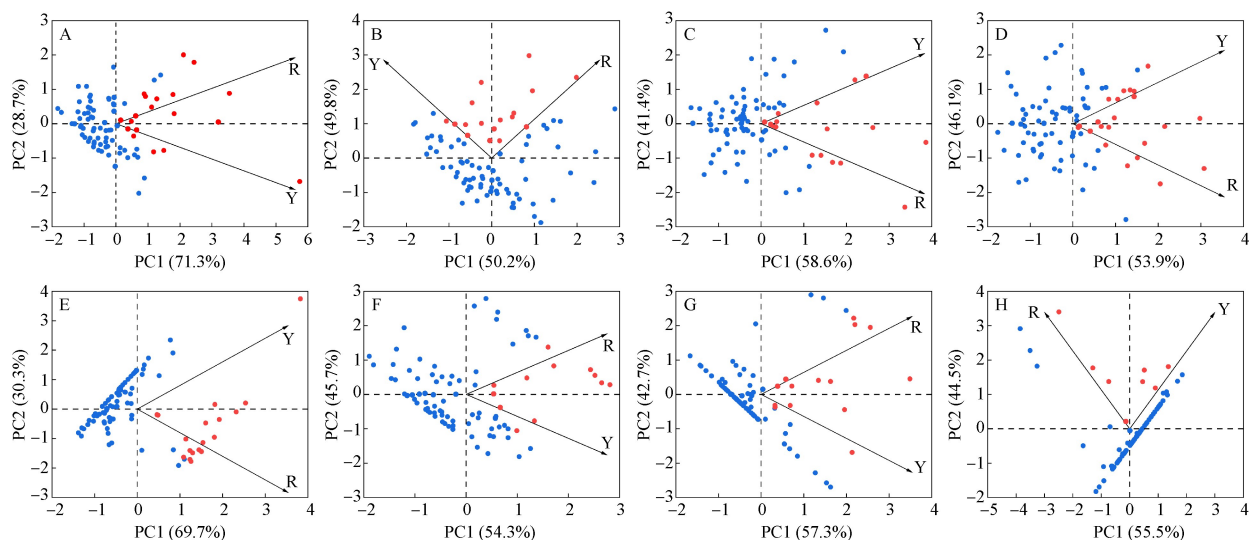
图 1 基于鲜枝叶精油得率和抑菌率采用群体均值四分法对杉木无性系的筛选结果
Fig. 1 Screening results of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. clones by using population mean quadrat method based on yield and antibacterial rate of essential oil from fresh branches and leaves

2.3.2 主成分分析对筛选结果的验证 为了验证群体均值四分法筛选结果的可靠性, 基于鲜枝叶精油得率和抑菌率, 对 4 个季节 88 个杉木无性系进行主成分分析。结果(图 2)显示: 各季节中, 依据精油得率及精油对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌抑制率筛选出的优良无性系均呈现特定分布, 并且, 多数优良无性

系分布在精油得率与抑菌率箭头的夹角内。

2.4 杉木鲜枝叶精油得率与抑菌率的关系

对不同季节杉木鲜枝叶精油得率与其对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率进行 Pearson 相关性分析, 结果(表 3)表明: 春季的精油得率与其对大肠杆菌的抑制率极显著 ($P < 0.01$) 正相关, 与其对金黄



●: 筛选出的优良无性系 The screened superior clones; ●: 其余无性系 The remaining clones. 括号内百分数为方差贡献率 The percentages in the parentheses indicate the variance contribution rates. Y: 精油得率 Yield of essential oil; R: 抑菌率 Antibacterial rate.

A, B, C, D. 基于不同季节精油得率及精油对大肠杆菌抑制率的分析结果 Analysis results based on yield of essential oil and inhibition rate of essential oil against *Escherichia coli* in different seasons; A. 春季 Spring; B. 夏季 Summer; C. 秋季 Autumn; D. 冬季 Winter. E, F, G, H. 基于不同季节精油得率及精油对金黄色葡萄球菌抑制率的分析结果 Analysis results based on yield of essential oil and inhibition rate of essential oil against *Staphylococcus aureus* in different seasons; E. 春季 Spring; F. 夏季 Summer; G. 秋季 Autumn; H. 冬季 Winter.

图2 基于鲜枝叶精油得率和抑菌率的杉木无性系主成分分析
Fig. 2 Principal component analysis for *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. clones based on yield and antibacterial rate of essential oil from fresh branches and leaves

表3 不同季节杉木鲜枝叶精油得率与抑菌率的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between yield and antibacterial rate of essential oil from fresh branches and leaves of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. in different seasons¹⁾

季节 Season	r_1	r_2
春 Spring	0.425 **	0.395 **
夏 Summer	-0.004	0.086
秋 Autumn	0.172	0.146
冬 Winter	0.079	-0.110

¹⁾ r_1 : 精油得率与精油对大肠杆菌抑制率间的相关系数 Correlation coefficient between yield of essential oil and inhibition rate of essential oil against *Escherichia coli*; r_2 : 精油得率与精油对金黄色葡萄球菌抑制率间的相关系数 Correlation coefficient between yield of essential oil and inhibition rate of essential oil against *Staphylococcus aureus*. **: $P < 0.01$.

色葡萄球菌的抑制率也极显著正相关;其余季节的精油得率与其对2种细菌的抑制率的相关性均不显著。

3 讨论和结论

精油得率是植物精油的一个重要指标。本研究采用水蒸馏法提取得到杉木88个核心无性系春、夏、秋、冬4个季节的鲜枝叶精油,精油得率的平均值分别为0.081%、0.085%、0.084%和0.079%,最大值为

0.257%。比较发现,虽然本研究的杉木鲜枝叶精油得率最大值约为蔡子轩等^[18]采用水蒸馏法得到的杉木无性系鲜枝叶精油得率(0.086%)的3倍,但是4个季节鲜枝叶精油得率的平均值却略低于该值,说明不同杉木无性系的精油成分积累存在较大差异。值得注意的是,各季节中不同无性系间的精油得率差异极显著($P < 0.01$),变异系数为30.68%~41.20%,且重复力均高于0.9,这可能与调控杉木精油合成的关键酶差异有关^[23-24],也可能与杉木不同无性系为适应外部环境而产生的生理代谢差异有关^[25],具体原因有待进一步研究。

植物精油为新型抑菌剂,能够大大提高植物的高值化应用潜力。已有研究表明:杉木精油具有抑菌活性^[13-14,26-27],给杉木尤其是杉木鲜枝叶带来了更加广阔的应用前景。然而,植物精油成分复杂^[28],成分组成和含量差异均会影响其抑菌活性^[29-30]。本研究结果显示:4个季节杉木无性系鲜枝叶精油对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均具有一定的抑制作用,且每个季节中鲜枝叶精油对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率在无性系间的差异极显著,变异系数均较大(分别为41.73%~102.64%和113.80%~299.96%),

且重复力较高(0.7 以上), 这可能与杉木不同无性系的精油在化学组分及含量上存在明显差异^[31]密切相关, 具体原因有待后续研究。另, 本研究中不同季节杉木鲜枝叶精油对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制率差异明显, 其中, 夏季杉木鲜枝叶精油对 2 种细菌的抑制率均最大, 与不同季节迷迭香 (*Rosmarinus officinalis* Linn.) 精油抑菌活性的检测结果较为相似^[32-33], 推测可能是夏季杉木鲜枝叶精油中与抑菌活性紧密相关的化学成分合成与积累增强所致, 具体原因有待进一步研究。

主成分分析是一种数据降维方法, 能够真实反映数据的原始分布情况^[34]; 主成分分析散点图则可以直观展示不同无性系之间的整体差异^[35]。在不同季节的主成分分析散点图中, 筛选出的优良无性系与其他无性系明显分离, 且主要分布在精油得率与抑菌率箭头的夹角内, 说明筛选出的杉木优良无性系在精油得率和抑菌率上明显有别于其余无性系, 同时证明了以精油得率和抑菌率为目标、采用群体均值四分法筛选杉木优良无性系结果可信。

相关性分析结果显示: 杉木鲜枝叶精油得率与抑菌率的相关系数存在明显的季节差异。研究发现, 黄心夜合 [*Michelia martini* (H. Lévl.) Finet et Gagnep. ex H. Lévl.] 在春季不但精油得率最高, 而且精油中的 α -蒎烯、 β -蒎烯等萜烯类化合物的相对含量也最高^[36], 而萜烯类化合物是一类具有抑菌活性的化学成分^[37-38]; 并且, 杉木鲜枝叶精油中含有萜烯类化合物^[18]。由此推测, 杉木鲜枝叶精油抑菌活性的季节差异可能与萜烯类化合物积累存在较大关联性。

以上研究结果显示: 供试杉木核心无性系的鲜枝叶精油得率及抑菌活性变异较大, 总体来看, 存在明显的季节性差异和无性系间差异。采用群体均值四分法在春、夏、秋、冬季分别筛选出 15、9、11、8 个优良无性系, 并且得到主成分分析验证支持。无性系 cx79 在 4 个季节均表现优异, 可作为杉木精油应用及专用型品种的优良候选材料。

参考文献:

- [1] MOUMNI S, ELAISSI A, TRABELSI A, et al. Correlation between chemical composition and antibacterial activity of some Lamiaceae species essential oils from Tunisia [J]. BMC Complementary Medicine and Therapies, 2020, 20: 103.
- [2] CAI J, YAN R, SHI J, et al. Antifungal and mycotoxin detoxification ability of essential oils: a review [J]. Phytotherapy Research, 2022, 36(1): 62-72.
- [3] ZHU S X, HU F F, HE S Y, et al. Comprehensive evaluation of healthcare benefits of different forest types: a case study in Shimen National Forest Park, China [J]. Forests, 2021, 12: 207.
- [4] SU Y C, HSU K P, HO C L. Composition, *in vitro* cytotoxicity, anti-mildew and anti-wood-decay fungal activities of the bark essential oil of *Cunninghamia lanceolata* var. *konishii* from Taiwan [J]. Natural Product Communications, 2018, 13(6): 775-778.
- [5] WANG J, LI J, LI S, et al. Antifungal activities of *Cunninghamia lanceolata* heartwood extractives [J]. BioResources, 2011, 6(1): 606-614.
- [6] 刘欢, 史懿乐, 雷化雨, 等. 食源性病原菌新型天然抑菌剂的开发研究进展 [J]. 食品科技, 2022, 47(7): 243-249.
- [7] BEZERRA A H, BEZERRA S R, MACÊDO N S, et al. Effect of estragole over the RN4220 *Staphylococcus aureus* strain and its toxicity in *Drosophila melanogaster* [J]. Life Sciences, 2021, 264: 118675.
- [8] 王蔚, 邵平扬, 郁勤龙, 等. 灵菌红素对创面分离耐甲氧西林金黄色葡萄球菌的抑菌效果及作用机制 [J]. 浙江医学, 2024, 46(14): 1531-1534, 1539.
- [9] 董伟, 徐希强, 汪新婵, 等. 植物精油缓解抗生素耐药研究现状 [J]. 中草药, 2020, 51(15): 4032-4041.
- [10] 唐文翔, 都龙, 王在天, 等. 单宁酸与乳清分离蛋白结合对紫苏精油抗菌乳液稳定性的影响 [J]. 食品科学, 2024, 45(12): 90-100.
- [11] 郑会全, 胡德活, 李小川, 等. 广东杉木短轮伐期优质林培育策略 [J]. 林业科技通讯, 2018(5): 20-23.
- [12] 陈代喜, 程琳, 黄开勇, 等. 30 年生杉木半同胞子代遗传特性测定及优良家系和单株选择 [J]. 南方农业学报, 2018, 49(2): 307-312.
- [13] 李孟滕, 宋熠杰, 庄雯迪, 等. 杉木精油化学成分及抑菌抗氧化活性研究报告 [J]. 当代畜牧, 2020(12): 28-32.
- [14] 叶舟, 林文雄, 陈伟, 等. 杉木心材精油抑菌活性及其化学成分研究 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2394-2398.
- [15] 马守肖, 段昊沅, 朱凯. 过热水蒸气提取杉木精油及组成分析 [J]. 精细化工, 2022, 39(12): 2521-2526.
- [16] 龙忠举, 洪雅真, 徐沛瑶, 等. 超临界 CO₂ 萃取杉木屑精油工艺研究及其成分分析 [J]. 广东化工, 2024, 51(20): 26-29.
- [17] HUANG R, WANG R, WEI R, et al. Selection for both growth and wood properties in Chinese fir breeding parents based on a 6-year grafted clone test [J]. Forests, 2023, 14: 1774.
- [18] 蔡子轩, 周欢, 李吉跃, 等. 杉木鲜枝叶精油提取及组分分析 [J]. 亚热带植物科学, 2023, 52(3): 203-209.
- [19] 周连玉, 钟睿, 焦璐, 等. 黄绿蜜环菌多糖抗氧化活性及抑菌活性研究 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(15): 6-10.
- [20] 唐文婷, 孙玥, 孙庆杰, 等. 兼具抗氧化及抗菌活性的玉米醇溶蛋白肽制备及其乳化特性 [J]. 食品科学, 2022, 43(11): 57-66.
- [21] STUDEBAKER G. A "rationalized" arcsine transform [J]. Journal of Speech and Hearing Research, 1985, 28: 455-462.

- alkaliphilic *Bacillus flexus* XJU-3 and analysis of its alkaline amylase[J]. 微生物学报, 2008, 48(6): 750-756.
- [33] REMONSELLEZ F, CASTRO-SEVERYN J, PARDO-ESTÉ C, et al. Characterization and salt response in recurrent halotolerant *Exiguobacterium* sp. SH31 isolated from sediments of Salar de Huasco, Chilean Altiplano[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 2228.
- [34] REHAN M, AL-TURKI A, ABDELMAGEED A H A, et al. Performance of plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) isolated from sandy soil on growth of tomato (*Solanum lycopersicum* L.)[J]. *Plants*, 2023, 12: 1588.
- [35] BOONMAHOME P, NAMWONGSA J, VORASOOT N, et al. Single and co-inoculum of endophytic bacteria promote growth and yield of Jerusalem artichoke through upregulation of plant genes under drought stress[J]. *PLoS ONE*, 2023, 18(6): e0286625.
- [36] PUŁAWSKA J, WILLEMS A, SOBICZEWSKI P. *Rhizobium skierniewicense* sp. nov., isolated from tumours on chrysanthemum and cherry plum [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2012, 62: 895-899.
- [37] MOLISZEWSKA E, NABRDALIK M, PUŁAWSKA J, et al. Tubercle disease of sugar beet roots (*Beta vulgaris*) found in Poland is neither caused by *Xanthomonas beticola* nor by tumorigenic *Agrobacterium/Rhizobium* [J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2018, 125: 581-583.
- [38] 陈文新, 汪恩涛, 陈文峰. 根瘤菌-豆科植物共生多样性与地理环境的关系[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(1): 81-86.
- [39] WANG Y, ZHNG Z, ZHANG P, et al. Rhizobium symbiosis contribution to short-term salt stress tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. *Plant and Soil*, 2016, 402: 247-261.
- [40] 邹萌萌, 周卫红, 张静静, 等. 根瘤菌对 Cu 胁迫下白三叶生长和 Cu 含量的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2019, 28(1): 62-70.

(责任编辑: 佟金凤)

(上接第 83 页 Continued from page 83)

- [22] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 28-31.
- [23] HOU J, ZHANG J, ZHANG B, et al. Transcriptional analysis of metabolic pathways and regulatory mechanisms of essential oil biosynthesis in the leaves of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl [J]. *Frontiers in Genetics*, 2020, 11: 598714.
- [24] REHMAN R, HANIF M A, MUSHTAQ Z, et al. Biosynthesis of essential oils in aromatic plants: a review [J]. *Food Reviews International*, 2016, 32(2): 117-160.
- [25] 苏 铁, 林智熠, 侯政杰, 等. 木本植物精油研究进展[J]. *世界林业研究*, 2021, 34(4): 61-66.
- [26] HSIAO W W, LAU K M, CHIEN S C, et al. Antifungal activity of cedrol from *Cunninghamia lanceolata* var. *konishii* against *Phellinus noxius* and its mechanism[J]. *Plants*, 2024, 13: 321.
- [27] YILDIRIM B, KUMLAY A M, EKICI K, et al. Chemical constituents and antibacterial activities of essential oils of common mugwort (*Artemisia vulgaris* L.) from Eastern Anatolia Flora[J]. *Ponte*, 2016, 72(9): 159-169.
- [28] 刘世尧, 张智宏, 卞京军, 等. 重庆野生土荆芥不同部位精油成分分析[J]. *植物资源与环境学报*, 2025, 34(3): 106-109.
- [29] 王巨媛, 翟 胜. 植物精油应用进展及开发前景展望[J]. *江苏农业科学*, 2010, 38(4): 1-3.
- [30] 李珊珊, 邹 晖, 杨 敏, 等. 5 个不同品系迷迭香精油对金线莲尖孢镰刀菌的抑菌活性及 GC-MS 成分分析[J]. *中国生物防治学报*, 2023, 39(4): 950-960.
- [31] 于晓锐, 何美清, 刘 云, 等. 4 个无性系杉木心材挥发性成分的 GC-MS 分析[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2021, 41(1): 110-117.
- [32] 潘 岩, 白彤彤, 李 慧, 等. 栽培地区、采收季节和株龄对迷迭香精油成分和抑菌活性的影响[J]. *植物学报*, 2012, 47(6): 625-636.
- [33] SPRENGER S, WOLDEMARIAM T, KOTCHONI S, et al. Lemongrass essential oil and its major constituent citral isomers modulate adipogenic gene expression in 3T3-L1 cells[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2022, 46: e14037.
- [34] 黄 芳, 周 熙, 罗辉泰, 等. 基于 HPLC-Q-TOF-MS 及化学模式识别方法对陈皮的化学成分快速鉴别及产地判别研究[J]. *中草药*, 2022, 53(20): 6361-6368.
- [35] WANG L, GENG J, LI C, et al. Quality comparison between two species of *Artemisiae scopariae* Herba through qualitative analysis of HPLC fingerprint and quantitative analysis of 12 representative constituents[J]. *Separation Science Plus*, 2024, 7: e202400077.
- [36] 雷凌华, 李胜华, 曾军英, 等. 黄心夜合不同季节鲜叶挥发性成分研究[J]. *植物科学学报*, 2017, 35(1): 107-114.
- [37] 郭阿君. 红皮云杉自然挥发物成分及抑菌作用[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2016, 17(6): 736-740.
- [38] MAHIZAN N A, YANG S, MOO C, et al. Terpene derivatives as a potential agent against antimicrobial resistance (AMR) pathogens [J]. *Molecules*, 2019, 24(14): 2631.

(责任编辑: 佟金凤)