

张红心,王桂兰,王继红,等. 18种木醋液理化性质及抑菌活性比较[J]. 山西农业科学, 2025, 53(4):36-46.

ZHANG H X, WANG G L, WANG J H, et al. Comparison of physicochemical properties and antibacterial activity among 18 wood vinegars[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(4):36-46.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.04.05

18种木醋液理化性质及抑菌活性比较

张红心¹, 王桂兰¹, 王继红¹, 陈超¹, 黄志新²

(1.唐山师范学院 生命科学系, 河北 唐山 063000; 2.唐山市新雅诺生物科技有限公司, 河北 唐山 063000)

摘 要:为了比较不同木醋液对致病细菌的抑制效果,进而明确木醋液中的抑菌成分,筛选出抑菌效果良好的木醋液以用于生产实践,以18种木醋液为研究对象,采用顶空气质联用(HS-GC-MS)对木醋液所含有有机组分进行测定,并检测这些木醋液的总酚和总酸含量、抑菌圈直径、最小抑菌体积分数(MIC)、最小杀菌体积分数(MBC),最后对木醋液中的成分与抑菌圈直径大小进行相关性分析。结果表明,在18种木醋液中共检测出284种有机组分,各种木醋液有机组分数范围在81~137种。18种木醋液中总酸含量最高为19.80%,最低为1.23%;总酚含量最高为1.577 mg/L,最低为0.198 mg/L。梨树枝、桃树枝、核桃枝、法桐枝、苹果枝、木麻黄枝木醋液对枯草芽孢杆菌具有抑菌活性,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌抑菌和杀菌活性较强,对这3种细菌的最小抑菌体积分数(MIC)范围为3.91~15.63 $\mu\text{L}/\text{mL}$,而对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌最小杀菌体积分数(MBC)范围为7.81~15.63 $\mu\text{L}/\text{mL}$,但上述木醋液均不能杀死枯草芽孢杆菌。木醋液对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌的抑菌活性与总酸、总酚以及2-甲氧基苯酚、3-甲基苯酚含量呈显著正相关。

关键词:木醋液;抑菌效果;HS-GC-MS;有机组分;总酚含量;总酸含量

中图分类号:TQ455 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2481(2025)04-0036-11

Comparison of Physicochemical Properties and Antibacterial Activity among 18 Wood Vinegars

ZHANG Hongxin¹, WANG Guilan¹, WANG Jihong¹, CHEN Chao¹, HUANG Zhixin²

(1.Department of Life Sciences, Tangshan Normal College, Tangshan 063000, China;

2.Tangshan Xinyanuo Biotechnology Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

Abstract: To compare the antibacterial effects of different wood vinegars on some pathogenic bacteria, and elucidate the antibacterial chemical components of wood vinegars so as to select wood vinegar sources with excellent antibacterial effect and apply them in practices, in this study, taking eighteen wood vinegars as materials, organic components in the wood vinegars were measured by employing Headspace Gas Chromatography-Mass Spectrometry(HS-GC-MS). The contents of total phenol and total acid, together with the inhibition zone diameters, the minimum inhibitory concentration(MIC), and minimum bactericidal concentration(MBC) were also determined respectively, and last, correlation analysis between the components in wood vinegars and inhibition zone diameter was practiced. The results showed that, totally 284 organic components had been detected in all 18 wood vinegars, with 81 to 137 components being detected in each kind of wood vinegar. Among 18 wood vinegars, the content of total acids reached the highest level of 19.8% and the lowest 1.23%, while the content of total phenols reached the highest of 1.577 mg/L and the lowest 0.198 mg/L, respectively. Wood vinegars derived from pear branch, peach branch wood, walnut branch, oriental plane branch, apple branch, and coast oak branch showed excellent antibacterial effects with the values of minimum inhibitory concentration(MIC) against the *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, and *Bacillus subtilis* strains ranging from 3.91 $\mu\text{L}/\text{mL}$ to 15.63 $\mu\text{L}/\text{mL}$, and the values of minimum bactericidal concentration(MBC) against *E. coli* and *S. aureus* strains being from 7.81 $\mu\text{L}/\text{mL}$ to 15.63 $\mu\text{L}/\text{mL}$. *B. subtilis* was not completely killed by all wood vinegars described above. The antibacterial activity of wood vinegar against the *E. coli*, *S. aureus*, and *B. subtilis* was significantly

收稿日期:2024-10-21

基金项目:河北省重点研发项目(213777113D);唐山师范学院校级项目(20254129016)

作者简介:张红心,副教授,博士,主要从事植物生物资源的开发和利用研究, E-mail:736934141@qq.com

positively correlated with the total organic acids, total phenols, 2-methoxyphenol, and 3-methylphenol contents.

Keywords: wood vinegar; antibacterial activity; HS-GC-MS; organic component; total acid content; total phenol content

木醋液是生物质在热解过程中产生的气体混合物经冷凝分离后得到的红褐色或淡黄色液体,呈酸性,通常含有70%~90%水分^[1]。木醋液主要成分为有机组分和无机组分。有机组分主要包括酸、酚、酮、醛、酯等^[2-4]。已有研究表明,这些有机组分不仅具有较强的消杀有害细菌、真菌的能力,还具有抗氧化、调节植物生长等生物活性^[5-13]。木醋液中有机化合物种类及含量与干馏温度、干馏速率、原材料种类等直接相关^[14-19]。

用于制备木醋液的原料范围十分广泛,包括各种树木枝条和各种果壳类废弃物,如稻壳、秸秆、核桃壳、栗蓬、花生壳、酸枣核等^[20-21]。这些原料主要由木质素、纤维素以及半纤维素3种物质组成,且不同原料所含3种物质比例不同。因此,由这些原料制备的木醋液物理性质、化学组分和生物活性具有较大差异,进而导致不同木醋液的生物活性不同^[20,22]。

栗树、葡萄、梨、苹果、桃、山楂、核桃等是我国北方常见的果树,种植面积较大。法桐、柞树、杨树、柳树也是这些地区常见的道路、园林绿化树种,每年通过修剪这些树木,会产生大量农林废弃物,板栗、文冠果、艾草等加工后也会产生大量的废弃物。在能源有限、减少碳排放、合理利用生物质资源的背景下,利用这些农林废弃物通过干馏方式制备生物炭和木醋液,既可以解决环境问题、实现生物质循环利用,又可以将农林废弃物转化为高附加值的产品,实现农林废弃物综合利用的目标。有关不同来源木醋液理化性质、抑菌等生物活性的研究已有较多研究报道^[3,6,8,11,13-15]。WEI等^[7]研究了不同温度条件下核桃枝木醋液的抑菌作用,发现230~370℃温度下收集的木醋液抑菌作用最强。易允喻等^[8]在550℃下制取苦杏壳粗制木醋液,经过木炭粉处理后获得精致木醋液,并用其进行抑菌试验后,发现木醋液对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的MIC值分别为0.44%和0.46%,而且苦杏壳木醋液在温度变化、pH值改变、紫外光照射、活性碳吸附、微波加热等不同处理下,抑菌效果基本不变,具有良好的抑菌稳定性。张立华等^[10]采用干馏法(150~400℃)制得枣核木醋液,采用气相色谱-质谱联用仪检测到35种化合物,其

主要成分为酚类、酮类化合物和有机酸,其对大肠杆菌、青霉菌、石榴干腐病菌均有抑制作用,并呈现剂量依赖效应。李彦湘等^[13]比较了桃壳木醋液对7种真菌的抑菌作用,发现木醋液对黄色镰刀菌的抑菌作用最为显著,对其孢子萌发和生物量抑制率分别达90.09%和95.22%。木醋液主要通过破坏黄色镰刀菌细胞结构、扰乱菌体物质和能量代谢来达到其抑菌效果。这些研究多以1种或几种不同来源木醋液为材料,且各自设置的试验参数并不完全相同,因此,依据其结果比较不同木醋液的优劣并不科学。迄今为止,仍缺乏对多种不同来源木醋液理化性质及生物活性系统性的比较研究,制约了木醋液高效综合利用和商业化生产。

本研究测定了18种不同来源木醋液化学组分及相对含量,比较了不同来源木醋液的抑菌活性差异,以明确不同木醋液最小抑菌和杀菌体积分数,并对木醋液的成分和抑菌活性之间的关系进行探讨,旨在为各种木醋液在农业生产、食品加工、医药保健等领域中的应用提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

梨树枝、苹果枝、桃树枝、核桃枝、山楂枝、樱桃枝、法桐枝、臭椿枝、杨树枝、柳树枝、柞树枝、木麻黄枝、葡萄藤、艾草枝、栗树枝、栗蓬、文冠果枝和文冠果壳18种木醋液均由唐山市新雅诺生物科技有限公司制备。大肠杆菌 *Escherichia coli* (ATCC8739)、枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis* (ATCC 6633)由唐山师范学院农林废弃物综合利用实验室保存,金黄色葡萄球菌 *Staphylococcus aureus* (ATCC6538)购于上海鲁微科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 顶空质谱分析(HS-GC-MS) 采用TriPlus 500 GC (Thermo Fisher) 顶空自动进样器和Trace1300-ISQ7000 (Thermo Fisher) 气质联用仪进行木醋液成分分析。顶空进样条件为样品瓶体积20 mL,样品体积10 mL,孵化温度80℃,时间10 min,瓶压100 kPa,平衡时间30 s;进样环压55 kPa,温度100℃,环平衡时间30 s;进样口温度100℃,进样口流速1.0 mL/min,进样时间1 min,

针吹扫水平 2,分流比 20:1,传输线温度 100℃。

色谱采用的色谱柱型号为 624SilMS(30 mm×0.25 mm×1.40 μm),载气为氦气,体积流量为 1.00 mL/min;柱温为 40℃,恒温 3 min 后,以 10℃/min 的速率升温至 250℃,恒温 3 min。

质谱所用 EI 源的电子能量为 70 eV,离子源温度为 280℃,传输线温度为 250℃,质量扫描范围为 50~600 u。质谱标准库为 NIST17。

1.2.2 木醋液的基本性质测定 pH 值用酸度计进行测定;采用 NaOH 滴定法测定总酸含量,并折合成醋酸的质量分数;采用福林酚法进行总酚测定,并用表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)当量表示总酚含量。

1.2.3 抑菌圈测定 Luria-Bertani(LB)固体培养基灭菌后倒入直径 90 mm 的一次性培养皿中备用。分别用牙签挑取 LB 固体平板上的大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌单菌落,接种于 LB 液体培养基中,于 37℃振荡培养过夜。通过测量吸光度(A)值,用无菌水将菌浓度稀释为 1×10^9 cfu/mL。吸取菌液 100 μL,加入 LB 固体培养基中并用涂布棒将菌液涂布均匀。取高压灭菌后的牛津杯 3~4 个,均匀贴附在 LB 固体培养基上,在每个杯中分别加入 150 μL 木醋液原液以及木醋液:水(1:3)稀释液,空白对照加入 150 μL 无菌水。然后将平板置于 37℃生化培养箱,培养 24 h。采用十字交叉法测量其抑菌圈直径。每个试验处理最少 8 次重复。

1.2.4 最小抑菌体积分数(MIC)和杀菌体积分数(MBC)测定 采用常量肉汤稀释法测定各种木醋液的最小抑菌体积分数。分别用牙签挑取 LB 固体平板上的大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌单菌落,接种于肉汤(YM)液体培养基中,于 37℃振荡培养过夜,然后将菌液稀释至 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ cfu/mL,通过平板计数法计算菌液浓度,然后用 2×YM 培养基将菌液稀释至浓度约为 1×10^6 cfu/mL。取 18 组离心管,每组 8 个依次排列,第 1 管加入不同木醋液原液 1 mL,其余各管加入 0.5 mL 无菌去离子水,然后分别在每组第 1 管中吸取 0.5 mL 木醋液原液加入第 2 管,混匀后再吸取 0.5 mL 至第 3 管,依次连续倍比稀释至第 8 管,并从第 8 管中吸取 0.5 mL 弃去,另取 3 个离心管,加入 0.5 mL 无菌去离子水为阳性对照组,然后向每管中加入 0.5 mL 配制好的菌悬液。此时各管中木

醋液的体积分数依次为 500.00、250.00、125.00、62.50、31.25、15.63、7.81、3.91 μL/mL。将加入菌液的离心管于 37℃培养 1 d 后肉眼观察试验结果,以菌完全没有生长所对应木醋液体积分数为该菌 MIC。取最小 MIC 及以上 2 个体积分数的菌悬液 100 μL,涂布在 LB 平板上,然后 37℃,培养 24 h 后,观察有无菌落长出,以无菌落长出的最小体积分数为最小杀菌体积分数(MBC)。每组处理重复 3 次。

1.2.5 Pearson 相关性分析 以总酸含量、总酚含量、苯酚、2-甲氧基苯酚、2-甲基苯酚、3-甲基苯酚含量为自变量(X),以 3 种细菌的抑菌圈直径为因变量进行 Pearson 相关性分析。由于各种木醋液总酚含量和含水量不同,木醋液中酚类物质相对含量较高并不代表其绝对含量高。因此,在进行苯酚、2-甲氧基苯酚、2-甲基苯酚、3-甲基苯酚含量与抑菌圈直径 Pearson 相关性分析之前,需要估算各种酚类物质实际含量。

苯酚含量=苯酚相对含量/总酚相对含量×100%×木醋液总酚含量 (1)

2-甲氧基苯酚、2-甲基苯酚、3-甲基苯酚等计算方法与苯酚含量计算方法类似。

1.3 数据分析

采用 SPSS 22.0 数据统计软件进行单因素方差分析和 Pearson 相关性分析,利用 Duncan 法进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 木醋液基本理化性质

如表 1 所示,18 种木醋液颜色主要分为 3 类:法桐枝、梨树枝、木麻黄枝木醋液为深褐色,栗蓬、艾草枝、文冠果壳木醋液为暗黄色,其余木醋液为深浅不一的酒红色。木醋液 pH 值范围为 2.21~4.28,其中,法桐枝木醋液 pH 值最低,文冠果壳木醋液 pH 值最高。18 种木醋液中总酸含量最高的是法桐枝木醋液,为 19.80%;其次依次为木麻黄枝、桃树枝、苹果枝、梨树枝、核桃枝木醋液,总酸含量分别为 15.16%、14.85%、14.66%、14.58%、14.10%;而栗蓬、文冠果壳、艾草枝木醋液总酸含量均较低,分别为 1.60%、1.23%、1.38%。各种木醋液中总酚含量最高的为樱桃枝木醋液,梨树枝、法桐枝、核桃枝木醋液总酚含量依次降低,栗树枝、栗蓬木醋液总酚含量较低,艾草枝、文冠果壳

木醋液总酚含量最低。

表 1 18 种木醋液的基本理化性质
Tab.1 Basic physicochemical properties of 18 wood vinegars

种类 Type	颜色 Color	pH	总酸含量/% Total acid content	总酚含量/(mg/mL) Total phenolcontent
木麻黄枝木醋液 Coast oak branch wood vinegar	深褐色	2.99	15.16	0.962
法桐枝木醋液 Oriental plane branch wood vinegar	酒红色(Ⅰ)	2.21	19.80	1.149
桃树枝木醋液 Peach branch wood vinegar	酒红色(Ⅰ)	2.39	14.85	0.935
苹果枝木醋液 Apple branch wood vinegar	酒红色(Ⅱ)	2.54	14.66	0.917
梨树枝木醋液 Pear branch wood vinegar	酒红色(Ⅰ)	2.51	14.58	1.106
核桃枝木醋液 Walnut branch wood vinegar	酒红色(Ⅱ)	3.16	14.10	1.061
柞树枝木醋液 Oak branch wood vinegar	酒红色(Ⅰ)	2.91	11.09	0.902
樱桃木醋液 Cherry branch wood vinegar	酒红色(Ⅰ)	2.44	12.52	1.577
葡萄藤木醋液 Vitis vinifera branch wood vinegar	酒红色(Ⅱ)	2.62	9.98	0.804
柳树枝木醋液 Willow branch wood vinegar	酒红色(Ⅱ)	2.67	6.76	0.717
山楂枝木醋液 Hawthorn branch wood vinegar	酒红色(Ⅰ)	2.38	7.95	0.560
杨树枝木醋液 Poplar branch wood vinegar	酒红色(Ⅱ)	2.98	6.00	0.434
栗树枝木醋液 Chestnut branch wood vinegar	酒红色(Ⅱ)	2.76	6.73	0.315
臭椿木醋液 Ailanthus branch wood vinegar	酒红色(Ⅱ)	2.64	6.67	0.523
文冠果枝木醋液 Yellowhorn branch wood vinegar	酒红色(Ⅲ)	3.54	4.64	0.416
文冠果壳木醋液 Yellowhorn shell wood vinegar	暗黄色	4.28	1.23	0.198
栗蓬木醋液 Chestnut shell wood vinegar	暗黄色	3.10	1.60	0.348
艾草枝木醋液 Wormwood branch wood vinegar	暗黄色	3.76	1.38	0.208

注：Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ代表酒红色由深到浅。
Note: I, II, III represented the change of wine red color from deep to light.

2.2 木醋液化学成分分析

从表2可以看出,18种不同原料所制备的木醋液共检测出284种成分,其中,每种木醋液所含组分数范围量为81~137种。虽然各种木醋液成分不完全相同,但每种木醋液主要由酸类、酚类、酮类、酯类、醛类、呋喃类、苯类等物质组成。从表3可以看出,酸类物质相对含量较高的木醋液主要有木麻黄枝木醋液(36.55%)、苹果枝木醋液(27.22%)、梨树枝木醋液(22.69%),而文冠果壳木醋液酸类物质相对含量仅为0.3%,艾草枝木醋液和栗蓬木醋液没有检测到酸类物质。各种木醋液中酸类物质主要以乙酸为主。木醋液中酚类物质主要有苯酚、2-甲基苯酚、3-甲基苯酚、2-二甲氧基苯酚、甲酚,2,6-二甲氧基苯酚等。18种木醋液酚类物质相对含量范围为4.92%~16.13%,其中,苹果枝、艾草枝和文冠果壳木醋液的酚类物质相对含量最高,柳树枝、木麻黄枝和苹果枝木醋液依次次之。酮类物质相对含量最高的是文冠果壳木醋液,为48.2%,而法桐枝、核桃枝、栗蓬、木麻

黄枝、苹果枝、山楂枝和樱桃枝木醋液酮类相对含量较小,为20.69%~23.55%。酮类物质主要包含丙酮、丁酮、丁二酮、戊酮、己酮、环戊酮及其取代物、环戊烯酮及其取代物等。酯类物质相对含量较高的是木麻黄枝、苹果枝和梨树枝木醋液,相对含量为16.34%~19.96%;酯类物质相对含量较低的是栗蓬和艾草枝木醋液,分别为8.21%和9.03%。木醋液中酯类物质主要以乙酸甲酯、丙酸甲酯为主。梨树枝、木麻黄枝、栗树枝和苹果枝木醋液的乙酸甲酯相对含量较高,而桃树枝木醋液丙酸甲酯相对含量最高。栗树枝和栗蓬木醋液糠醛相对含量较高,分别为9.36%和11.19%,而木麻黄枝、苹果枝木醋液糠醛相对含量较低,不超过2%。木醋液中还含有少量丙醛。各种木醋液中也包含少量的呋喃类和苯类物质。

从表3可以看出,18种木醋液中酸类物质相对含量差异最大,酮类物质相对含量差异最小,木醋液样品间酚类物质相对含量差异也较小。

表 2 木醋液主要成分相对含量分析

Tab.2 The analysis of relative contents of principal chemical components in wood vinegar

%

种类 Type	乙酸 Acetic acid	丙酸 Propionic acid	2-甲氧基苯酚 Phenol, 2-methoxy	3-甲基苯酚 Phenol, 3-methyl	苯酚 Phenol	2-戊酮 2-pentanone	环戊酮 Cyclopentanone	2-环戊烯酮 2-cyclopenten-1-one	2-甲基-2-环戊烯酮 2-cyclopenten-1-one, 2-methyl	乙酸甲酯 Acetic acid, methyl ester	丙酸甲酯 Methyl propionate	糠醛 3-furaldehyde	苯 Benzene	甲苯 Toluene
木麻黄枝木醋液 Coast oak branch wood vinegar	31.8	0.00	3.67	1.99	1.99	0.38	0.71	1.19	1.04	13.51	2.66	1.78	0.00	0.00
法桐枝木醋液 Oriental plane branch wood vinegar	7.04	0.00	3.97	1.19	1.27	1.45	1.91	1.44	1.70	2.41	5.51	7.13	1.41	3.82
桃树枝木醋液 Peach branch wood vinegar	7.46	0.83	2.78	2.14	1.41	2.09	2.48	1.06	1.91	2.79	7.44	6.69	0.00	0.00
苹果枝木醋液 Apple branch wood vinegar	27.22	2.52	2.84	1.78	1.92	1.10	1.76	1.43	1.88	11.5	6.31	1.86	0.00	0.00
梨树枝木醋液 Pear branch wood vinegar	20.45	0.00	1.53	0.64	0.65	1.67	0.90	0.00	0.67	15.45	5.58	0.13	0.00	0.00
核桃枝木醋液 Walnut branch wood vinegar	4.69	1.91	3.24	1.74	1.05	1.61	1.97	1.81	1.66	2.22	5.20	5.51	2.71	4.82
柞树枝木醋液 Oak branch wood vinegar	3.28	1.06	4.05	1.08	1.06	2.56	2.51	1.00	1.97	2.84	5.79	5.97	1.41	1.00
樱桃枝木醋液 Cherry branch wood vinegar	4.88	1.98	3.27	1.49	2.10	1.45	1.85	1.14	1.60	2.10	5.22	6.30	3.25	5.39
葡萄藤木醋液 Vitis vinifera branch wood vinegar	4.86	0.79	3.06	1.44	2.60	2.25	2.31	1.54	2.01	2.21	4.61	3.90	2.22	4.09
柳树枝木醋液 Willow branch wood vinegar	4.56	0.00	3.64	3.29	4.76	1.70	2.08	1.32	2.08	3.72	4.75	6.51	1.00	1.74
山楂枝木醋液 Hawthorn branch wood vinegar	3.85	1.49	3.76	1.28	1.55	1.61	2.34	1.44	2.03	2.38	5.58	6.44	1.09	3.61
杨树枝木醋液 Poplar branch wood vinegar	2.08	0.55	4.44	1.65	5.65	1.74	2.58	1.41	2.21	3.20	4.95	5.85	0.40	0.94
栗树枝木醋液 Chestnut branch wood vinegar	16.5	1.21	2.66	1.11	1.09	2.15	1.28	0.00	1.45	9.51	2.77	11.19	0.00	0.00
臭椿枝木醋液 Ailanthus branch wood vinegar	3.48	0.48	3.34	2.67	1.89	2.82	2.27	1.24	2.03	2.72	4.13	5.32	2.53	3.81
文冠果枝木醋液 Yellowhorn branch wood vinegar	1.88	0.00	2.91	1.22	0.99	3.01	3.32	1.40	2.89	4.95	5.30	4.56	2.22	2.56

续表2 木醋液主要成分相对含量分析
Tab.2(Continued) The analysis of relative contents of principal chemical components in wood vinegar %

种类 Type	乙酸 Acetic acid	丙酸 Propionic acid	2-甲氧基苯酚 Phenol, 2-methoxy	3-甲基苯酚 Phenol, 3-methyl	苯酚 Phenol	2-戊酮 2-pentanone	环戊酮 Cyclopentanone	2-环戊烯酮 2-cyclopenten-1-one	2-甲基-2-环戊烯酮 2-cyclopenten-1-one, 2-methyl	乙酸甲酯 Acetic acid, methyl ester	丙酸甲酯 Methyl propionate	糠醛 3-furaldehyde	苯 Benzene	甲苯 Toluene
艾草枝木醋液 Wormwood branch wood vinegar	0.00	0.00	3.12	2.91	1.79	3.59	3.53	0.96	3.54	3.17	2.73	4.35	1.81	0.00
文冠果壳木醋液 Yellowhorn shell wood vinegar	0.30	0.00	3.15	2.58	1.73	4.08	3.76	1.09	3.15	4.43	4.51	0.00	1.56	2.12
栗蓬木醋液 Chestnut shell wood vinegar	0.00	0.00	1.36	0.62	1.15	1.42	1.54	0.00	1.49	1.97	2.55	9.36	5.29	5.71

表3 18种木醋液主要有机组分的相对含量分析
Tab.3 The analysis of relative contents of main organic components in 18 wood vinegars %

种类 Type	酚类 Acids	酸类 Phenolics	酮类 Ketones	酯类 Esters	醛类 Aldehydes
木麻黄枝木醋液 Coast oak branch wood vinegar	14.03	36.55	20.69	19.78	0.29
法桐枝木醋液 Oriental plane branch wood vinegar	10.68	9.61	22.63	19.97	1.04
桃树枝木醋液 Peach branch wood vinegar	9.61	8.37	29.24	25.88	5.76
苹果枝木醋液 Apple branch wood vinegar	12.06	27.22	23.55	27.82	0.68
梨树枝木醋液 Pear branch wood vinegar	5.51	22.69	31.20	26.68	2.40
葡萄藤木醋液 Vitis vinifera branch wood vinegar	11.18	5.59	24.46	17.33	3.66
核桃枝木醋液 Walnut branch wood vinegar	8.18	4.69	21.42	17.29	3.57
樱桃枝木醋液 Cherry branch wood vinegar	10.61	5.04	21.34	21.13	3.30
柞树枝木醋液 Oak branch wood vinegar	12.00	3.50	29.23	20.23	7.12
柳树枝木醋液 Willow branch wood vinegar	15.18	6.47	26.82	15.28	4.33
山楂枝木醋液 Hawthorn branch wood vinegar	10.51	3.89	26.22	21.63	3.89
杨树枝木醋液 Poplar branch wood vinegar	17.90	3.61	31.47	17.46	4.64
栗树枝木醋液 Chestnut branch wood vinegar	9.17	17.24	32.05	12.90	17.51
臭椿枝木醋液 Ailanthus branch wood vinegar	11.11	4.34	28.60	14.84	3.92
文冠果枝木醋液 Yellowhorn branch wood vinegar	9.35	2.15	36.95	16.07	5.25
文冠果壳木醋液 Yellowhorn shell wood vinegar	16.13	0.00	38.66	8.21	9.43
栗蓬木醋液 Chestnut shell wood vinegar	16.09	0.36	48.30	14.27	2.78
艾草枝木醋液 Wormwood branch wood vinegar	4.92	0.00	21.04	9.03	4.49

2.3 木醋液抑菌效果测定

2.3.1 抑菌圈大小分析 从表4可以看出,文冠果壳、栗蓬、艾草枝木醋液对大肠杆菌抑菌效果最弱,抑菌圈直径较小,与其他木醋液具有显著差异($P<0.05$),这3种木醋液按1:3(v/v)稀释后,基本不能抑制大肠杆菌的生长,无抑菌圈出现。其余15种木醋原液抑菌效果均较好,但木

醋液与水体积1:3稀释后,柳树枝、山楂枝、杨树枝、栗树枝、臭椿枝、文冠果枝来源的6种木醋液抑菌圈小于20 mm,与其他9种木醋液具有显著差异($P<0.05$)。进一步比较这6种抑菌效果较好的木醋液,发现文冠果枝木醋液抑菌圈直径为16.59 mm,与其余5种木醋液均具有显著性差异($P<0.05$)。

表 4 18 种木醋液抑菌圈直径分析
Tab.4 the analysis of inhibition zone diameters of 18 wood vinegars

mm

浓度 Concentration	种类 Type	大肠杆菌 <i>E. coli</i>	金黄色葡萄球菌 <i>S. aureus</i>	枯草芽孢杆菌 <i>B. subtilis</i>
原液 Original liquid	木麻黄枝木醋液	36.11±2.83b	26.98±2.40bc	33.69±2.50a
	法桐枝木醋液	37.85±2.26a	29.48±1.45a	34.17±2.03a
	桃树枝木醋液	35.94±2.45b	26.98±1.18c	34.20±3.34a
	苹果枝木醋液	32.54±2.66e	25.05±2.30d	30.57±2.59b
	梨树枝木醋液	33.95±1.76cde	28.61±1.96ab	31.73±1.94b
	葡萄藤木醋液	38.23±2.18a	27.53±1.48bc	28.08±2.16c
	核桃枝木醋液	37.54±2.29a	27.34±1.89bc	31.60±2.09b
	樱桃枝木醋液	34.45±2.41cd	24.66±1.76d	28.92±1.75c
	柞树枝木醋液	35.31±2.10bc	23.90±1.47de	28.89±2.23c
	柳树枝木醋液	32.54±2.66e	22.27±1.54f	21.58±1.76f
	山楂枝木醋液	33.39±1.78de	22.77±2.05ef	26.2±2.01d
	杨树枝木醋液	29.70±1.26f	23.10±1.27ef	24.57±2.35e
	栗树枝木醋液	33.13±1.38de	20.36±2.37g	24.26±1.82e
	臭椿枝木醋液	34.10±2.52cd	19.66±1.57g	24.04±1.95e
	文冠果枝木醋液	28.47±2.99f	20.08±0.98g	20.91±1.77f
	文冠果壳木醋液	16.82±1.39h	12.14±1.27h	10.23±0.32h
	栗蓬木醋液	19.85±1.62g	12.61±1.02h	11.79±1.51g
	艾草枝木醋液	20.06±1.36g	12.39±1.13h	—
1:3 稀释液 1:3 dilution liquid	木麻黄枝木醋液	20.80±1.04c	23.51±1.74a	18.14±1.68b
	法桐枝木醋液	24.09±2.07a	20.35±1.48b	20.70±1.98a
	桃树枝木醋液	22.34±1.88b	16.20±1.11e	18.30±1.61b
	苹果枝木醋液	21.99±1.39b	15.18±1.59fg	15.89±1.32cd
	梨树枝木醋液	23.81±2.09a	17.23±1.16d	15.89±2.05cd
	葡萄藤木醋液	20.81±1.72c	18.14±1.35c	12.2±1.08ef
	核桃枝木醋液	20.37±1.86c	14.47±0.60g	15.85±1.58cd
	樱桃枝木醋液	20.94±1.36c	14.50±1.31g	16.40±2.33c
	柞树枝木醋液	22.56±1.82b	16.46±1.15e	15.18±1.21d
	柳树枝木醋液	18.69±1.70d	15.02±1.42fg	14.82±2.32d
	山楂枝木醋液	18.01±1.46de	15.47±0.87f	12.77±1.57e
	杨树枝木醋液	17.14±1.58ef	12.35±0.77hi	11.42±0.79g
	栗树枝木醋液	18.74±2.27d	11.78±0.74hi	11.56±1.41g
	臭椿枝木醋液	17.17±1.31ef	11.69±0.74i	11.39±1.66g
	文冠果枝木醋液	16.59±0.87g	12.51±1.46h	9.42±0.69h
	文冠果壳木醋液	—	—	—
	栗蓬木醋液	—	—	—
	艾草枝木醋液	—	—	—

注:—表示无抑菌圈出现。不同小写字母表示同一浓度下不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: — indicated no appearance of the inhibition zone diameter. Different lowercase letters indicated significant differences among different treatments at the same concentration($P<0.05$).

文冠果壳木醋液、栗蓬木醋液、艾草枝木醋液对金黄色葡萄球菌抑菌作用最弱,其抑菌圈直径显著小于其他木醋液($P<0.05$)。经 1:3 稀释后,

这 3 种木醋液基本不能抑制金黄色葡萄球菌生长,在平板上没有观察到抑菌圈。其余 15 种木醋液经 1:3 稀释后,木麻黄枝木醋液抑菌圈直径最

大,法桐枝木醋液次之。杨树枝、栗树枝、臭椿枝、文冠果枝木醋液抑菌圈直径显著小于其他木醋液($P<0.05$)。

艾草枝木醋液基本不能抑制枯草芽孢杆菌生长, LB平板上没有抑菌圈出现。文冠果壳和栗蓬木醋液抑菌圈直径显著小于其他木醋液($P<0.05$), 且用其1:3稀释液进行抑菌圈试验后, 在LB平板上观察不到抑菌圈。其余15种木醋液以1:3稀释后, 法桐枝和梨树枝木醋液抑菌效果较佳, 而杨树枝、栗树枝、臭椿枝、文冠果枝木醋液抑菌圈直径显著小于其他木醋液($P<0.05$)。

2.3.2 最小抑菌体积分数和最小杀菌体积分数分析 抑菌圈试验结果表明, 文冠果壳、艾草枝、栗蓬木醋液抑菌活性极低, 稀释4倍后基本就失去抑菌作用, 因此, 仅使用剩余15种木醋液进行MIC和MBC的测定。由表5可知, 木麻黄枝、法桐枝、桃树枝、苹果枝、梨树枝、葡萄藤、核桃枝、樱桃枝、柞树枝木醋液对大肠杆菌的MIC为7.81 $\mu\text{L}/\text{mL}$, 而其余木醋液MIC则为15.63 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 。木麻黄枝、法

桐枝木醋液对大肠杆菌杀菌作用较强, 最小MBC为7.81 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 。而文冠果枝木醋液杀菌作用最弱, 其MBC为62.50 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 。杨树枝、栗树枝、臭椿枝木醋液杀菌作用较弱, MBC为31.25 $\mu\text{L}/\text{mL}$, 其余木醋液的MBC为15.63 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 。

对金黄色葡萄球菌而言, 木麻黄枝木醋液的MIC为7.81 $\mu\text{L}/\text{mL}$, 抑菌作用最强。而杨树枝、栗树枝、臭椿枝、文冠果枝木醋液抑菌效果较弱, MIC均为31.25 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 。木麻黄枝木醋液对金黄色葡萄球菌杀菌作用也最强, MBC为7.81 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 。而臭椿枝木醋液、文冠果枝木醋液对金黄色葡萄球菌的MBC为31.25 $\mu\text{L}/\text{mL}$, 杀菌作用最弱。

法桐枝木醋液和木麻黄枝木醋液对枯草芽孢杆菌抑菌效果较好, 其MIC分别为3.91、7.81 $\mu\text{L}/\text{mL}$, 而臭椿枝木醋液和文冠果枝木醋液对枯草芽孢杆菌抑菌作用最差, 其MIC均为31.25 $\mu\text{L}/\text{mL}$ 。15种木醋液均不能杀死枯草芽孢杆菌。其原因可能是枯草芽孢杆菌有内生芽孢, 木醋液难以渗入进去, 因此, 不能完全杀死枯草芽孢杆菌。

表5 不同木醋液对3种细菌的最小抑菌体积分数和最小杀菌体积分数分析
Tab.5 The analysis of minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) of different wood vinegars $\mu\text{L}/\text{mL}$

种类 Type	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i>		金黄色葡萄球菌 <i>Staphylococcus aureus</i>		枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	
	MIC	MBC	MIC	MBC	MIC	MBC
木麻黄枝木醋液 Coast oak branch wood vinegar	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81	
法桐枝木醋液 Oriental plane branch wood vinegar	7.81	7.81	15.63	15.63	3.91	
桃树枝木醋液 Peach branch wood vinegar	7.81	15.63	15.63	15.63	7.81	
苹果枝木醋液 Apple branch wood vinegar	7.81	15.63	15.63	15.63	15.63	
梨树枝木醋液 Pear branch wood vinegar	7.81	15.63	15.63	15.63	15.63	
葡萄藤木醋液 Vitis vinifera branch wood vinegar	7.81	15.63	15.63	31.25	15.63	
核桃枝木醋液 Walnut branch wood vinegar	7.81	15.63	15.63	15.63	15.63	
樱桃枝木醋液 Cherry branch wood vinegar	7.81	15.63	15.63	31.25	15.63	
柞树枝木醋液 Oak branch wood vinegar	7.81	15.63	15.63	31.25	15.63	
柳树枝木醋液 Willow branch wood vinegar	15.63	15.63	15.63	31.25	15.63	
山楂枝木醋液 Hawthorn branch wood vinegar	15.63	15.63	15.63	31.25	15.63	
杨树枝木醋液 Poplar branch wood vinegar	15.63	31.25	31.25	31.25	31.25	
栗树枝木醋液 Chestnut branch wood vinegar	15.63	31.25	31.25	31.25	31.25	
臭椿枝木醋液 Ailanthus branch wood vinegar	15.63	31.25	31.25	62.50	31.25	
文冠果枝木醋液 Yellowhorn branch wood vinegar	15.63	62.50	31.25	62.50	31.25	

2.4 Pearson相关性分析

选取18种木醋原液的总酸、总酚、苯酚, 2-甲氧基苯酚, 2-甲基苯酚, 3-甲基苯酚含量与抑菌圈直径进行了Pearson相关性分析, 结果如表6所示, 木

醋液的3种细菌抑菌圈直径与总酸含量、总酚含量、2-甲氧基苯酚、3-甲基苯酚均呈极显著正相关关系($P<0.01$); 木醋液苯酚含量与大肠杆菌和葡萄球菌抑菌圈直径均呈显著正相关关系($P<0.05$)。

表 6 木醋液有机成分与抑菌圈直径的 Pearson 相关性分析

Tab.6 Pearson correlation analysis between the contents of organic components and inhibition zone diameters

有机成分 Organic components		大肠杆菌抑菌圈直径 The diameter of the inhibition zone of <i>E. coli</i>	金黄色葡萄球菌抑菌圈直径 The diameter of the inhibition zone of <i>S. aureus</i>	枯草芽孢杆菌抑菌圈直径 The diameter of the inhibition zone of <i>B. subtilis</i>
总酸	Total acids	0.817**	0.915**	0.936**
总酚	Total phenolics,	0.715**	0.798**	0.763**
苯酚	Phenol	0.522*	0.553*	0.403
2-甲氧基苯酚	Phenol, 2-methoxy-	0.701**	0.740**	0.707**
2-甲基苯酚	Phenol, 2-methyl-	0.230	0.343	0.321
3-甲基苯酚	Phenol, 3-methyl-	0.637**	0.635**	0.622**

注:**表示极显著相关($P<0.01$),*表示显著相关($P<0.05$)。

Note: ** indicated extremely significant correlation($P<0.01$), and * indicated significant correlation($P<0.05$).

3 结论与讨论

本研究发现,18种木醋液之间的有机成分种类、相对含量差异较大,其中,苹果枝、梨树枝、木麻黄枝等木醋液的酸类相对含量较高,而板栗木醋液的糠醛含量较高。提示不同木醋液包含的生物活性物质差异较大,进而导致其功能(如抑菌、抗氧化等)差异较大。不同木醋液可选择性地应用于不同生物活性物质的研究。木醋液总酸含量与pH值不完全相关,表明除醋酸等酸类物质外,其他物质如苯酚等也参与了木醋液pH值的调节。

目前,已有较多不同种类木醋液抑菌活性的比较研究。高海霞等^[23]比较了杜仲粗木醋液、扁桃壳粗木醋液、山茱萸果核粗木醋液、花椒杆粗木醋液对金黄色葡萄球菌、产气杆菌、灵杆菌和枯草杆菌的MIC,发现这几种木醋液对这些细菌的抑菌效果有明显差异。段晓玲等^[24]测定了白桦木醋液,杂木木醋液,木屑木醋液及蒸馏木屑木醋液对大肠杆菌,金黄色葡萄球菌,枯草芽孢杆菌3种供试细菌的MIC,结果表明,4种木醋液对3种供试细菌均有较强的抑制作用,以蒸馏木屑木醋液抑菌效果最佳。针对木醋液酸类物质、酚类物质与抑菌活性的关系也做了较多研究。刘星宇等^[25]研究发现,木醋液酚类提取物对包括耐药菌株在内的多种致病菌均具有良好的抑制作用,并且酚类化合物抑菌活性显著强于酮类化合物。张浩宽等^[26]收集了不同解热温度下的山茱萸木醋液样品,并将其所含的10种主要组分质量浓度与其抑菌活性进行了相关性分析,发现抑菌活性与乙酸、丙酸、丁酸、戊酸、愈创木酚、2,6-二甲氧基苯酚等有机

成分呈显著正相关。本研究与张浩宽等^[26]研究结果一致,18种木醋液对3种细菌的抑菌圈直径与木醋液总酸、总酚含量、2-甲氧基苯酚、3-甲基苯酚等含量呈显著正相关,表明酸类和酚类化合物与木醋液抑菌活性紧密相关。为了研究有关木醋液中某一酚类物质或酸类物质在木醋液抑菌性能中所起的作用,唐山师范学院农林废弃物综合利用课题组前期用质量分数与木醋液相当的愈创木酚、乙酸、以及二者复配物开展抑菌试验,发现其最大抑菌圈直径显著小于木醋液。侯晓梅等^[27]也研究发现,木醋液酸类提取物抑菌效果明显低于木醋液和米诺环素。这些研究结果表明,木醋液抑菌性能可能是多种酚类、酸类以及其他成分协同作用的结果。

本研究发现,艾草枝、栗蓬、文冠果壳木醋液对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌的抑菌效果最差,稀释4倍后就失去了抑菌能力,其原因可能是这3种木醋液的总酸含量较低,而且本研究采用HS-GC-MS方法未检测到这3种木醋液中含有乙酸。因此,这3种木醋液不建议在生产实践中使用。其余15种木醋液中,木麻黄枝、法桐枝、桃树枝、苹果枝、梨树枝木醋液对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌的抑菌效果最好,其MIC值较低。这可能与这6种木醋液总酚、2-甲氧基苯酚的含量较高相关。杨树枝、栗树枝、臭椿枝、文冠果枝木醋液抑菌效果相对较弱,MIC值较高,其余木醋液抑菌效果位于二者之间。因此,在生产上使用这些木醋液时,应依据每种木醋液抑菌强弱,进行不同倍数稀释,从而达到较好的抑菌效果。本研究所提供的MIC和MBC数值可供生

产实践参考。

本研究发现,栗木枝木醋液中糠醛相对含量较高,而梨树枝木醋液、柞树枝木醋液苯类物质相对含量也较高,糠醛、甲苯、苯等物质是公认的有毒物质。因此,在使用这些木醋液时,建议采用蒸馏、柱纯化等技术对木醋液进行纯化,以消除有毒、有害组分。

苹果、梨树、桃树、葡萄、栗树、山楂、核桃等果树是我国北方地区大面积种植果树,柳树、杨树等也是常见的街道、园林绿化树种,每年这些树木修剪后会产生大量的农林废弃物。然而,通过无氧热解这些农林废弃物,可以生产多种木醋液。本研究分析比较了18种不同木醋液抑菌活性差异,筛选出抑菌或杀菌效果较好的木醋液,确立了每种木醋液的MIC和MBC,从而为木醋液在生产实践中的应用提供了参考依据。此外,在制备木醋液的同时也形成了生物炭,其有望应用于土壤改良、环境污染治理等方面。将木醋液及木炭生产应用于农林、畜牧、医药食品业,不仅会提升农林废弃物的附加价值和资源利用效率,也有助于促进农林产业绿色、无公害发展,构建农林资源循环经济产业链。

参考文献:

- [1] MATHEW S, ZAKARIA Z A, MUSA N F. Antioxidant property and chemical profile of pyrolygneous acid from pineapple plant waste biomass[J]. Process Biochemistry, 2015, 50(11): 1985-1992.
- [2] 王海英,李玉生,杨国亭,等. 柞木木醋液有机成分分析[J]. 东北林业大学学报, 2005, 33(3): 110-112.
WANG H Y, LI Y S, YANG G T, et al. Analysis on the organic components of wood vinegar for *Mongolian oak*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2005, 33(3): 110-112.
- [3] 周建斌,迟菲,秦恒飞. 稻壳醋液的成分分析及抑菌、杀菌性能研究[J]. 林产化学与工业, 2011, 31(2): 63-68.
ZHOU J B, CHI F, QIN H F. Component analysis, inhibitory and germicidal performances of rice husk vinegar[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2011, 31(2): 63-68.
- [4] 文世涛,徐茹婷,孙康,等. 竹材微炭化干燥工艺中液体产物特性分析[J]. 生物质化学工程, 2024, 58(4): 1-7.
WEN S T, XU R T, SUN K, et al. Analysis on the characteristics of liquid product obtained from slight-carbonization drying process of bamboo[J]. Biomass Chemical Engineering, 2024, 58(4): 1-7.
- [5] 周岭,蒋恩臣,罗健. 锯末木醋液对玉米种子萌发及幼苗影响的研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 58-60.
ZHOU L, JIANG E C, LUO J. Effects of wood vinegar on seed germination and seedling growth of corn[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(5): 58-60.
- [6] WEI Q, MA X H, DONG J E. Preparation, chemical constituents and antimicrobial activity of pyrolygneous acids from walnut tree branches[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2010, 87(1): 24-28.
- [7] WEI Q, MA X H, ZHAO Z, et al. Antioxidant activities and chemical profiles of pyrolygneous acids from walnut shell[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2010, 88(2): 149-154.
- [8] 易允喻,马希汉,赵忠,等. 苦杏壳木醋液最小抑菌浓度及其抑菌活性的稳定性[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(6): 127-131, 135.
YI Y Y, MA X H, ZHAO Z, et al. Minimal inhibitory concentration and activity stability of bitter almond shell pyrolygneous acid to bacteria[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(6): 127-131, 135.
- [9] 梁凤臣,张丽丽,李艳,等. 木醋液浸种对西葫芦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(16): 51-55.
LIANG F C, ZHANG L L, LI Y, et al. Effect of wood vinegar on seed viability and seedling growth of summer squash[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(16): 51-55.
- [10] 张立华,孙凤杰,赵文亚,等. 石榴皮木醋液的化学成分及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2016, 37(8): 127-130.
ZHANG L H, SUN F J, ZHAO W Y, et al. Chemical constituents and antioxidant activities of wood vinegar from pomegranate husk[J]. Food Science, 2016, 37(8): 127-130.
- [11] 张立华,王丹,宫文哲,等. 枣核木醋液化学成分分析及其抑菌活性[J]. 食品科学, 2016, 37(14): 123-127.
ZHANG L H, WANG D, GONG W Z, et al. Chemical constituents and antimicrobial activities of pyrolygneous acid from jujube pit[J]. Food Science, 2016, 37(14): 123-127.
- [12] 周建云,覃青青,刁朝强,等. 不同木醋液对干旱胁迫烤烟生长及生理的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(10): 2232-2236.
ZHOU J Y, QIN Q Q, DIAO C Q, et al. Effects of different wood vinegar on growth and physiology of flue-cured tobacco under drought stress[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(10): 2232-2236.
- [13] 李彦湘,丁德东,何静,等. 木醋液对几种植物病原真菌的抑菌活性与作用机制[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(9): 2149-2159.
LI Y X, DING D D, HE J, et al. Antifungal activity and mechanism of wood vinegar against several plant pathogenic fungi[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2023, 35(9): 2149-2159.
- [14] 尉芹,马希汉,朱卫红,等. 不同温度段苹果枝木醋液化学组成、抑菌及抗氧化活性比较[J]. 林业科学, 2009, 45(12): 16-21.
YU Q, MA X H, ZHU W H, et al. Comparison of chemical compositions, antimicrobial and antioxidant activities of pyrolygneous acids of apple branches[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(12): 16-21.
- [15] 翟梅枝,何文君,王磊,等. 3种木醋液化学成分与抑菌活性研究[J]. 西北植物学报, 2010, 30(6): 1247-1252.
ZHAI M Z, HE W J, WANG L, et al. Chemical compositions and antimicrobial activities of three wood vinegars[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(6): 1247-1252.
- [16] 胡瑞端,朱铭强,梁军,等. 不同热解温度下杜仲枝粗木醋液抗氧化及抑菌活性研究和成分分析[J]. 西北林学院学报,

- 2016, 31(6):220-226.
- HU R R, ZHU M Q, LIANG J, et al. Antioxidant and antimicrobial activities and component analysis of crude pyroligneous acids of *Eucommia ulmoides* branch made at different temperatures[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6):220-226.
- [17] 卢辛成, 蒋剑春, 何静, 等. 杉木屑分段热解制备木醋液及其特性研究[J]. 林产化学与工业, 2019, 39(2):96-102.
- LU X C, JIANG J C, HE J, et al. Preparation and properties of wood vinegar from pyrolysis of fir sawdust under different temperatures[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2019, 39(2):96-102.
- [18] 王才威, 张守玉, 杨东杰, 等. 木醋液制备及形成机理研究进展[J]. 化工进展, 2020, 39(9):3723-3738.
- WANG C W, ZHANG S Y, YANG D J, et al. Research advance in preparation and formation mechanism of wood vinegar[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9):3723-3738.
- [19] 卢胜男, 周岭, 王龙杰, 等. 木醋液的制备及其在农业方面的应用研究进展[J]. 山西农业科学, 2023, 51(2):225-232.
- LU S N, ZHOU L, WANG L J, et al. Research progress on preparation of wood vinegar and its application in agriculture[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(2):225-232.
- [20] 郭根茂, 黄青, 王青青, 等. 基于实验与文献研究热解温度和原料对木醋液组分的影响[J]. 天然产物研究与开发, 2021, 33(8):1371-1381.
- GUO G M, HUANG Q, WANG Q Q, et al. The effect of pyrolysis temperature and raw materials on the composition of wood vinegar based on experiments and literature[J]. Natural Product Research and Development, 2021, 33(8):1371-1381.
- [21] 赵淑蕻, 李卓洁, 刘晓锋, 等. 秸秆木醋液的制备及应用研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, 51(1):1-10.
- ZHAO S H, LI Z J, LIU X F, et al. Research progress on preparation and application of straw wood vinegar[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(1):1-10.
- [22] 卢胜男, 周岭, 王龙杰, 等. 木醋液的制备及其在农业方面的应用研究进展[J]. 山西农业科学, 2023, 51(2):225-232.
- LU S N, ZHOU L, WANG L J, et al. Research progress on preparation of wood vinegar and its application in agriculture[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(2):225-232.
- [23] 高海霞. 不同农林废弃物木醋液理化性质与生物活性的比较研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- GAO H X. Comparative studies on chemical profiles and biological activities of different agricultural and forestry residues[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012.
- [24] 段晓玲, 王海英, 刘志明, 等. 农林废弃物干馏产物木醋液的抑菌活性[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2):425-429.
- DUAN X L, WANG H Y, LIU Z M, et al. Antibacterial activities of wood vinegar from agricultural and forestry wastes dry distillation products[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(2):425-429.
- [25] 刘星宇. 木醋液抑菌功能性及应用研究[D]. 长春:吉林大学, 2022.
- LIU X Y. Study on antibacterial activity and application of wood vinegar[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [26] 张浩宽, 郭盛, 尚尔鑫, 等. 山茱萸药材加工过程废弃物制备木醋液的化学成分分析及抑菌活性评价[J]. 中草药, 2022, 53(5):1372-1381.
- ZHANG H K, GUO S, SHANG E X, et al. Chemical constituent analysis and antibacterial activity evaluation of wood vinegar prepared from waste produced in the processing of *Corni fructus*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(5):1372-1381.
- [27] 侯晓梅. 杜仲枝木醋液及其酚酸提取物抑菌与抗氧化特性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- HOU X M. Studies on antimicrobial and antioxidant characteristics of wood vinegars and its phenolic acid extracts obtained from *Eucommia ulmoides* olivers branches[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.