

生物质基木醋液的制备工艺和增效技术研究进展

张立丹, 霍鹏举, 梁嘉敏, 郭涛, 樊小林, 孙少龙*

(华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要:木醋液是生物质热解制炭产生的高价值酸性副产物, 具有来源丰富、无污染、成本低等特点。如果将木醋液中的成分进行转化并加以利用, 对促进生物质资源利用具有重要意义。木醋液的主要成分为有机酸、醇类、酚类、醛类和酮类等多种有机物和微量金属元素, 具有刺激作物生长、抑制病原菌生长和抗氧化的作用, 通过不同的制备工艺和增效技术将木醋液应用于植物上是目前的研究热点。通常, 木醋液生产途径可分为工业生产木醋液和实验室制备木醋液, 但初步制备出的木醋液含有某些有毒物质, 需要进一步精制, 精制的过程主要采用过滤法、活性炭吸附法、蒸馏法、静置法、低温法、萃取法等。笔者基于近年来国内外木醋液的研究动态, 简述了木醋液的制取和精制, 分析了目前木醋液精制方法的优缺点, 介绍了木醋液对植物生长的作用机理; 概述了木醋液在粮食、水果、蔬菜和其他作物上的增效技术和应用效果, 总结出木醋液具有促进种子发芽和植物生长、抑制作物病原菌、提高作物产量和抗逆性以及改良土壤等功能。然而, 木醋液在开发和利用方面尚无明确的统一标准, 且对植物的增效机制尚不明确。今后, 研究重点应主要集中在不同原料和不同工艺制备的木醋液对植物促生的作用机理和土壤的改良机理等方面, 研究结果将为木醋液开发、高效利用及农业绿色发展提供参考。

关键词:木醋液; 制备工艺; 作用机理; 植物生长; 增效技术; 生物质热解

中图分类号: TQ449+.4

文献标志码: A

文章编号: 2096-1359(2023)05-0027-10

Research progress on preparation process and synergistic technology of biomass-based wood vinegar

ZHANG Lidan, HUO Pengju, LIANG Jiamin, GUO Tao, FAN Xiaolin, SUN Shaolong*

(College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Wood vinegar is a high-value acidic by-product obtained by biomass pyrolysis, which has the advantages of abundant sources, no pollution and low cost. It is of great significance to promote the utilization of biomass resources if the components in wood vinegar are converted and utilized. The main components of wood vinegar are organic acids, alcohols, phenols, aldehydes and ketones, and trace metal elements, which can stimulate crop growth, inhibit pathogenic bacteria growth and resist oxidation. The application of wood vinegar to plants by different synergistic techniques is a research hotspot at present. Generally, the utilization of wood vinegar can be divided into laboratory preparation and industrial production. However, the preliminarily prepared wood vinegar contains some toxic substances, which needs to be further refined. The refining processes mainly include filtration, activated carbon adsorption, distillation, standing, and low temperature extraction. Based on the research trends of wood vinegar domestically and internationally in recent years, the preparation and refining of wood vinegar were briefly described, and the advantages and disadvantages of the current refining methods of wood vinegar were analyzed. For example, the filtration could selectively filter organic components, but the operation was complicated, and the cost was high. The activated carbon adsorption was low in cost, simple in operation, and good performance in refining, but its selectivity and pertinence were poor, and a small amount of organic acids was also removed. The mechanism of wood vinegar on plant growth was introduced. For example, spraying wood vinegar on crops could increase chlorophyll content, proline content, amylase activity and protease activity, thus increasing crop yield and drought resistance. At the same time, applying wood vinegar to the soil can reduce the soil pH and promote the ion migration among soil colloids, thus increasing the available phosphorus content in the soil. The increasing efficiency technology and application effect of wood vinegar on grain, fruit, vegetable and other crops were summarized. It was concluded that the wood vinegar could promote seed germination and plant growth, inhibit crop pathogens, improve crop yield and stress resistance, and improve soil. However, there is no clear unified standard for the production and utilization of wood vinegar, and the synergistic mechanism of wood vinegar on plants is still unclear.

收稿日期: 2022-11-07

修回日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(22178137); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-31)。

作者简介: 张立丹, 女, 助理研究员, 研究方向为香蕉营养与施肥研究。通信作者: 孙少龙, 男, 教授。E-mail: sunshaolong328@scau.edu.cn

In the future, the research focus should be mainly on the mechanism of promoting plant growth and soil improvement of the wood vinegar prepared by different raw materials and processes. The research results would provide reference for the efficient utilization and green development of wood vinegar.

Keywords: wood vinegar; preparation process; action mechanism; plant growth; synergistic technology; biomass pyrolysis

随着不可再生资源的大量消耗,全球对可再生资源的开发和利用越来越重视。生物质资源具有来源丰富、无污染、成本低等特点,我国仅秸秆每年产量将近 7.4 亿 t^[1],如果能充分利用这些生物质资源,可有效解决不可再生资源短缺和环境污染等问题。随着生物质炭制备技术的发展,生物质资源得到了充分的利用。然而,在生物质炭制备过程中会产生大量的烟气,其经冷凝液化得到红褐色液体木醋液,具有烟熏香味,含有水、有机酸、醇类、酚类、醛类和酮类等有机物以及少量的 Fe、Zn 等微量元素。木醋液起源于欧洲的干馏工业,随后传入日本,日本开发了许多有关木醋液的农用产品,如土壤改良剂、植物生长促进剂、杀菌剂等。20 世纪 80 年代以后,延安科学院、上海市农业科学院等高等院校开始对木醋液的使用剂量、使用方法、作用效果等进行了研究,结果表明,适宜的使用剂量对植物的生长具有促进作用。目前,美国、韩国和日本对木醋液的研究已经相对成熟,主要用于农业、畜牧业、林业、食品、医药工业等领域。木醋液作为生物质热解的副产物,其具有绿色、无污染、促进作物生长和抑制杂草等特点,既对环境友好,又可增产增收。我国作为农业大国,具有非常丰富的生物质资源。笔者通过介绍木醋液研究现状、作用机理、制备工艺等,以期作为木醋液应用于农业生产提供参考。

1 木醋液的制取及作用机理

1.1 木醋液的分类与成分

1.1.1 木醋液的分类

根据木醋液的成分不同,可以分为粗制木醋液和精制木醋液。粗制木醋液是植物热解过程中产生的烟气经过冷凝回流得到的棕褐色、半透明液体,其不但含有利于植物生长的有机酸类物质,还含有不利于植物生长的酚类、甲醛和焦油等有害物质。精制木醋液是粗制木醋液经过简单的制取方法得到的一种性质稳定的淡黄色液体,其对人畜和植物的危害极少甚至没有,能够直接用于农林、食品、医药等领域^[2-5]。

1.1.2 木醋液的成分

木醋液的组成成分及其含量因原料、热解温度

和催化剂的不同而存在差异,其主要含有水、有机酸、醇类、酚类、醛类和酮类等 200 多种有机物,除此之外,还含有 Fe、Zn 等微量元素(图 1)。张立华等^[6]使用气相色谱-质谱联用仪分析石榴皮木醋液,检测出 27 种物质,例如苯酚、乙酸、木焦油醇、2,6-二叔丁基对甲酚等;王元等^[7]分析了不同温度下核桃壳木醋液的成分,结果表明,3 种温度下均包含乙酸、苯酚、丙酸和 2-甲基-2-环戊烯酮等 11 种物质。

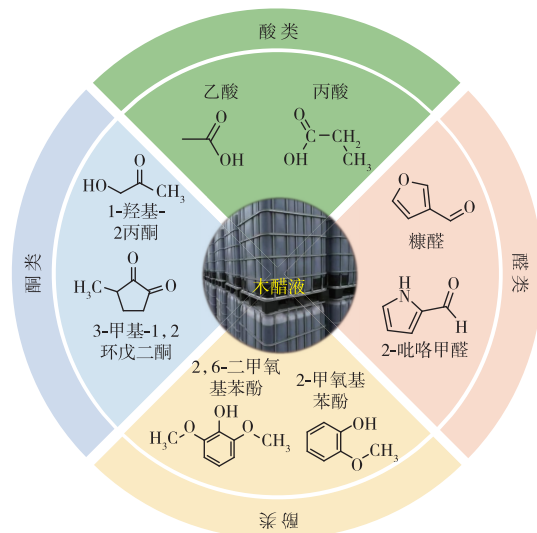


图 1 木醋液的主要成分

Fig. 1 The main ingredients of wood vinegar

任衍森等^[8]评估了不同温度对木醋液的酸类物质、热值、密度和含水率的影响,当热解温度从 300 °C 上升到 700 °C 时,木醋液中的酸类物质呈降低的趋势,含水率先增大后减小,500 °C 时含水率最大。相反,密度和热值先减小后增大。另一方面,不同的热解温度收集到的木醋液产率和各物质含量不同。因此,在木醋液热解制备时可以通过控制热解温度,即按温度分阶段收集目标木醋液,提高木醋液的效用。在木醋液的制备中,催化剂也是影响木醋液成分和产率的因素之一^[9]。催化剂不但可以降低反应的活化能,降低木醋液热解时的温度,从而提高木醋液的产率;还可以改变生物质热解过程中断键的位置,制备出所需目标成分的木醋液^[10]。例如,在碱土金属的作用下,提高了热解气体和固体的产率,降低了焦油的产率^[11]。不同的热解温度通过影响木醋液的基本理化性质,从而影响生物质热解制备木醋液的组分及含量,结果见表 1。

表 1 不同生物质制得木醋液的主要成分						
Table 1 Main components of wood vinegar from different biomasses						单位: %
原料	酚类	酸类	酮类	酯类	醛类	文献
棉杆	18.93	11.19	19.83	4.78	4.22	[12]
核桃壳	—	37.43	1.33	1.14	0.63	[13]
苹果木	56.75	25.07	6.36	1.02	—	[14]
花生壳	14.51	41.27	19.30	2.82	0.92	[15]
苦杏壳	42.83	23.00	6.23	0.27	12.54	[16]
松子壳	53.88	3.78	20.93	4.14	3.91	[17]
小麦秆	28.68	22.16	21.22	2.58	1.44	[18]
竹	13.90	42.20	8.90	18.30	11.20	[19]
酸枣壳	6.10	11.10	3.88	—	0.90	[20]

1.2 木醋液的制备工艺

1.2.1 木醋液的制取

木醋液是生物质材料炭化制备生物质炭过程

中产生的烟气经过冷凝产生的具有高价值的副产物。目前,生产木醋液的途径主要分为工业制备木醋液和实验室制备木醋液。工业制备木醋液首先将生物质粉碎为粉末状,随后用制棒机压制成型,并放入气化炉里经过 800 ℃ 高温碳化,最后经过气体冷却系统制得粗制木醋液。实验室制备木醋液是先将生物质粉碎后置于具有 100 mL 去离子水的高压反应釜中,随后将氮气充入反应器以排出内部空气,再密封反应器,最后,将反应器加热至设定温度(180~280 ℃),通过冷凝装置收集粗制木醋液(图 2)。然而,粗制木醋液含有焦油等有毒物质,通常需要对粗制木醋液进行纯化,分离出焦油得到精制木醋液,才能被使用。

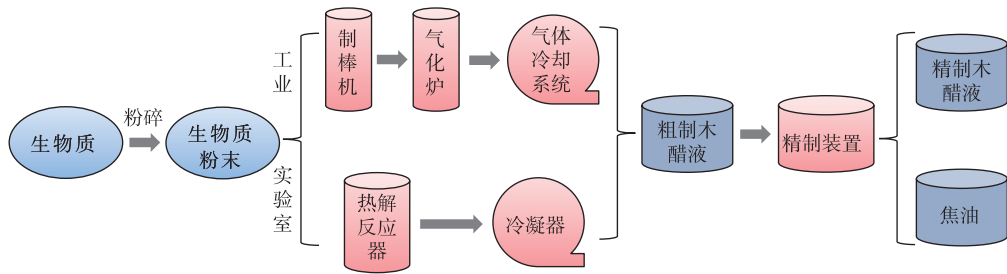


图 2 木醋液的制备工艺流程
Fig. 2 Flow chart of wood vinegar preparation process

1.2.2 木醋液的精制

粗制木醋液中含焦油和苯酚等有害物质,不能直接用于农业生产,需要根据不同的用途对粗制木醋液进行精制得到目标产品。常用的精制方法有过滤法、活性炭吸附法、蒸馏法、静置法、低温法、萃取法等。

1) 过滤法。在热解制备木醋液过程中产生的固体杂质一般采用过滤法去除,常用的过滤方法有针式过滤法、倾析过滤法、膜过滤法和真空过滤法。Wu 等^[21]使用针式过滤器去除木醋液中的木炭粉末,得到精制木醋液。然而,该方法存在操作烦琐且耗时长缺点,限制了其大规模应用。许英梅等^[22]研究了膜过滤法对松树木醋液成分的影响。结果显示,膜过滤得到的精制木醋液中丙酸、丁酸和乙酸的质量分数有所下降,说明膜既能过滤有色大分子也能拦截部分丙酸、丁酸和乙酸,有利于羧酸、愈创木酚和苯酚等物质的积累。该方法精制效果好,可以选择性过滤有机成分,但是操作复杂,费用较高。

2) 活性炭吸附法。活性炭是一种具有高比表面积的多孔碳质材料,活性炭吸附的原理就是利用其较大的比表面积吸附粗制木醋液中的木焦油和

有气味的气体。活性炭吸附的效果受时间、活性炭用量和活性炭种类的影响,其中活性炭种类是影响木醋液精制效果的主要因素。活性炭用量增加,吸附位点也随之增加,木醋液的精制效果更加明显。然而,使用量过高会造成木醋液有效成分的损失,所以需要找到一个最佳的使用量。吸附时间越长,精制效果也会越明显,时间太长会造成木醋液部分组分的解析。活性炭的种类不同,其表面孔的数量和大小就不相同,精制效果就会大不相同。例如,张晶晶等^[23]对硬木活性炭、竹炭和杉木活性炭影响竹醋液原液的脱臭和脱色效果进行了评估。结果显示,硬木活性炭能更好地去除竹醋液原液中的烟熏味和颜色。然而,对竹醋液精馏液而言,杉木活性炭去除效果最佳。柏明娥等^[24]研究了不同精制方法对竹醋液理化性质的影响,发现随着活性炭用量的增加,竹醋液的 pH 呈增大趋势,而竹醋液的吸光度、总酸、折光率和焦油含量逐渐变小。该方法具有成本低、操作简单、产品回收率高、精制效果好等优点,但是其选择性差、针对性不高,同时会去除少量的有机酸。

3) 蒸馏法。蒸馏法的原理是利用混合物组分沸点的差异分离出不同的组分,通常分为常压蒸馏

法和减压蒸馏法。常压蒸馏法是首先将木醋液中低沸点的酸类和水蒸馏出来,其次再蒸馏高沸点的酚类,最后反复蒸馏去除大部分焦油和不稳定的物质。Li 等^[25]利用一级蒸馏与液体蒸馏的方法分离木醋液,发现在 96 ℃ 下,二次蒸馏得到了乙酸、1-羟基-2-丙烷和一些酚类,而在 97 ℃ 下,二次蒸馏得到乙酸和少量酚类,且二次蒸馏得到的液体可用作食品级木醋液,其内部的有毒成分几乎完全去除。减压蒸馏法是指利用醋液中各组分沸点的不同进行分离,同时通过调节温度和压强来促进目标组分的分离。张文标等^[26]利用减压蒸馏法精制木醋液,得到的木醋液中有机酸质量分数 7.5%~10.0%、醋酸 4.0%~7.0%、焦油 0.5%~2.0%、甲醇和苯酚则几乎为零。总之,蒸馏法对木醋液中焦油的分离效果好、分类程度好,且操作相对简单。

4) 静置法。静置法的原理是利用木醋液中各组分密度的差异而自然沉淀分层,将木醋液置于阴暗环境中几个月,甚至几年,其体系会分为 3 层,其中上层为轻质焦油、中层为木醋液、下层为重质焦油^[27]。尉芹等^[28]将核桃壳木醋液静置 1 个月,木醋液分离为 3 层,从上到下分别为油状物、木醋液澄清液和黏稠的木焦油。常青等^[29]以玉米秸秆和小麦为原料制备的木醋液,静置 6 个月才得到了澄清的木醋液。

5) 低温法。低温法的原理是指利用低温技术调节木醋液的凝固点分离出焦油。Ma 等^[30]研究发现,粗制木醋液在 -5~20 ℃ 精制时,温度越低分离所需要的时间越短。当分离的温度为 20 ℃ 时,分离木醋液中焦油需要 350 h。然而,当分离的温度为 5 ℃ 时,分离木醋液中的焦油则仅需要 12 h。低温法优点是分离所需要的时间短,缺点是分离效果相对较差。

6) 萃取法。萃取法的原理是加入与目标物质相似而与木醋液中其他物质不同的萃取剂,分离出所需要的物质。卢辛成等^[31]研究了不同萃取剂对木醋液中活性部分的富集作用。结果表明,乙醚对酚类物质富集效果最好,而乙酸乙酯则对酮类物质具有良好的富集作用。张珊珊^[32]采用 pH 梯度萃取法,对核桃壳木醋液中的酸性成分进行分类,发现 5% (质量分数) NaHCO_3 溶液萃取有机酸的效果最好,且抑菌效果也最好。萃取法可以很好地富集有机组分,分离后的木醋液效果好但用途单一。

1.3 木醋液对植物生长的作用机理

木醋液含有 200 多种有机物和少量的微量元素,不同木醋液中各成分的比例也不同,且不同植

物对木醋液的敏感性也不同,所以其作用机理尚不清晰。周建云等^[33]通过研究木醋液对烤烟的影响,得出施用木醋液可以减少活性氧的积累,从而提高叶绿素含量,最终表现为烤烟产量增加。此外,施用木醋液可降低干旱胁迫下烤烟的丙二醛含量,提高脯氨酸含量,从而降低了烤烟膜损伤的程度,提高其抗旱性。斯日本极等^[34]认为适宜浓度的木醋液能够提高土壤中淀粉酶和蛋白酶的活性,从而促进土壤有机质和氮素的积累与转化。潘洁等^[35]研究发现含有机活性分子的木醋液,施入土壤后能够降低土壤 pH,促进土壤胶体之间的离子迁移,从而增加了土壤中有效磷含量。此外,木醋液中可能含有促进糖分转化的成分,可以提高番茄可溶性糖含量。马梦瑶等^[36]通过研究木醋液对种子盐胁迫的影响,发现木醋液中含有的有机酸可以使细胞酸化,造成根部细胞积累酸性物质促进细胞分裂分化,从而促进植物的生长发育,提高植物对盐胁迫的抗性。

2 木醋液在不同作物上的增效技术和应用效果

2.1 木醋液对粮食作物的影响

木醋液含有促进作物生长的无机养分和调节作物生长的有机养分,可以促进种子萌发、幼苗生长和养分吸收,提高作物的产量,改善作物品质。胡世龙等^[37]研究了不同施氮水平下,喷施木醋液对水稻产量和食用品质的影响,结果表明施用木醋液可以显著提高水稻产量;同时,稻米的糙米率、精米率和食味品质均明显提升。Simma 等^[38]通过对水稻分别进行赤霉素和木醋液的种子引发处理,发现与赤霉素处理相比,木醋液处理同样可以达到提高水稻发芽率,抑制水稻稻田杂草的生长,从而提高养分利用率,增加水稻产量。Jeong 等^[39]研究发现,施用木醋液能够提高养分有效性和改善土壤质量,从而促进植物生长。卢辛成等^[40]研究了杉木屑木醋液对小麦幼苗生长及内源激素含量的影响,木醋液通过逆境胁迫效应改变内源激素的含量,进而促进小麦生长。Lu 等^[41]探究了木醋液对小麦种子的生长调节机制,发现其能够促进小麦侧根生长,提高小麦根系活力。木醋液不仅对植物本身有促进作用,其含有的酸类和酚类化合物也可以抑制细菌和真菌的生长。郭运玲等^[42]研究了木醋液对玉米大斑病的影响,发现木醋液不仅能抑制菌丝生长,而且还能抑制分生孢子萌发,改变菌丝细胞形态。木醋液在上述粮食中的具体增效技术和应用效果见表 2。

表 2 木醋液在粮食作物上的增效技术和应用效果

Table 2 Synergistic technology and application effect of wood vinegar on grain crops

粮食作物	木醋液原料	增效技术和应用效果	文献
水稻	杨木	在不同的施氮水平下,喷施木醋液与不施用木醋液相比,施用木醋液可以显著提高水稻产量;同时,稻米的糙米率、精米率和食味品质均明显提升	[37]
	—	对水稻种子分别进行赤霉素和木醋液的浸种处理,与赤霉素处理相比,木醋液处理的水稻种子发芽率与其差异不显著,且抑制了稻田杂草生长,提高了产量	[38]
	—	对水稻盆栽根施木醋液,提高了土壤的养分有效性,改善了土壤质量,从而促进了植物生长	[39]
小麦	杉木屑	设置不同浓度梯度的木醋液小麦水培实验,发现高浓度木醋液抑制小麦幼苗生长,低浓度木醋液降低小麦丙二醛的含量,同时增加生长素和赤霉素含量,降低脱落酸含量,促进小麦幼苗生长,体积分数为 0.25 mL/L 时对小麦幼苗生长最有利	[40]
	杉木	对小麦种子分别进行无菌水和木醋液浸种处理,与无菌水处理相比,适宜浓度的木醋液提高了根系活力,促进了小麦侧根生长	[41]
玉米	—	对玉米盆栽根施木醋液,发现木醋液质量浓度为 25.25 mg/mL 时,对玉米大斑病菌菌株菌丝生长和玉米大斑病菌孢子萌发有明显抑制作用,抑制率分别为 100% 和 90.4%	[42]

注:“—”表示文献中未提及木醋液原料种类。下同。

2.2 木醋液对水果的影响

木醋液中含有的酮类、醛类、酚类、酯类等有机物质和少量的微量元素,为土壤中微生物和甜瓜生长提供了充足的养分,增加了土壤中细菌的数量和丰富度,显著提高了总根长、总根表面积、总根体积和根尖数^[43]。于红梅等^[44]研究了木醋液对草莓植株生长、发育、产量的影响,发现木醋液稀释 400 倍效果最佳,其显著增加了细菌和放线菌的数量,改善了植株根系环境。此外,木醋液可以增加细菌和放线菌的丰度,抑制病原菌的生长,降低植株的

发病率^[45]。刘勇等^[46]研究了木醋液对桃炭疽病病原菌的抑菌效果,结果表明,木醋液对炭疽病原菌菌丝生长有较好的抑制作用,可有效提高猕猴桃对 N、P、K 的吸收,进而增加猕猴桃中可溶性固形物和维生素 C 的含量,显著提高猕猴桃的品质^[47]。何堂熹等^[48]研究了喷施木醋液对芒果果实品质的影响,发现喷施木醋液可以有效提高芒果株产、单果质量、可溶性果胶含量和可溶性糖含量,降低可滴定酸,促进芒果转色。木醋液在上述水果中的具体增效技术和应用效果见表 3。

表 3 木醋液在水果上的增效技术和应用效果

Table 3 Synergistic technology and application effect of wood vinegar on fruits

植物	木醋液原料	增效技术和应用效果	文献
甜瓜	—	通过浇灌不同稀释倍数的木醋液,与对照组相比,稀释 600 倍木醋液处理不仅显著促进甜瓜根系生长,提高甜瓜根际土壤中可培养微生物数量以及微生物生物量碳、氮、磷和涉及土壤碳、氮、磷循环相关酶的活性,而且有效地提高了甜瓜根际土壤细菌丰富度	[43]
草莓	—	随着喷施木醋液的浓度增大,促进植株生长的效果越好,浓度 400 倍为最适浓度,有利于草莓生长发育,提高草莓产量以及子苗繁育质量	[44]
	—	通过将木醋液添加到培养基中,与对照组相比,木醋液处理对桃黑根霉的生长有显著的抑制效果,且能很好地降低桃的腐烂率、腐烂指数、呼吸强度和丙二醛的含量,有效地延缓桃的软化和衰老	[45]
桃	—	采用菌丝生长速率抑制法测定不同稀释浓度的木醋液对桃炭疽病病原菌的抑制效果,与对照组相比,木醋液对桃炭疽病病原菌菌丝生长具有较好的抑制效果,且木醋液稀释 50 倍和百菌清稀释 800 倍效果相当	[46]
猕猴桃	苹果树和杂木	通过对猕猴桃树喷施和根施不同稀释倍数的木醋液,发现与对照相比,施用木醋液可以显著提高维生素 C 和可溶性固形物的含量,同时减少果实中可滴定酸的含量,降低果实硬度,提高猕猴桃的品质	[47]
芒果	秸秆	在采摘前,喷施不同浓度的木醋液,发现木醋液稀释 200 倍和 400 倍处理可以提高芒果的可溶性固形物、可溶性总糖、维生素 C 含量,降低可滴定酸含量,从而提高果实单株质量和株产	[48]

2.3 木醋液对蔬菜的影响

木醋液在茄子、小白菜、平菇、番茄和辣椒上应用也有较多实例。例如,木醋液含有作物生长的营养物质,施入土壤为茄子提供养分,增加其根系活力,进而促进光合作用和新陈代谢^[49]。王晓朋等^[50]研究了木醋液对蔬菜生长和品质的影响,发现

叶面喷施木醋液可以提高小白菜株高、鲜质量、维生素 C 和可溶性糖的含量,促进还原性糖的积累,降低硝酸盐含量。木醋液不仅能促进蔬菜的生长,而且具有环境友好、产品无残留、抑菌等优点,且在生物防治方面也有明显的效果。徐岩岩等^[51]研究了精制山杏壳木醋液对平菇细菌性褐斑病菌的影响,发

现适宜的木醋液能够抑制平菇菌丝的生长,其中木醋液浓度越大,抑菌活性越强。肖辉等^[52]将木醋液与杀菌剂配合施用,发现提高了杀菌剂对番茄枯萎病、灰霉病的防治效果,达到了减药增效的效果。传统的防治方式会导致病原菌抗药性和环境污染风险增加,木醋液具有杀菌抗病作用,如果能够部分代替农药使用,将对降低农药危害、保障食品安全起到非

常重要的作用。Benzon 等^[53]评估了木醋液对番茄的影响,发现施用适宜浓度木醋液可以提高番茄产量和品质。杜佳燕等^[54]探究了木醋液对辣椒种子萌发及其抑菌作用的影响。结果表明,木醋液能够提高辣椒种子的发芽率、发芽指数,同时能够抑制辣椒致病菌的生长。木醋液在上述蔬菜中的具体增效技术和应用效果见表 4。

表 4 木醋液在蔬菜上的增效技术和应用效果

Table 4 Synergistic technology and application effect of wood vinegar on vegetables			
植物	木醋液原料	增效技术和应用效果	文献
茄子	玉米、小麦秸秆和杂木	将不同浓度木醋液根施,发现适宜稀释倍数的木醋液可以增加叶绿素含量,调节土壤 pH 和可溶性盐浓度值,促进茄子的生长发育	[49]
小白菜	香菇废菌棒	木醋液叶面喷施,能提高小白菜的株高、鲜重,以及还原性糖、维生素 C、土壤碱解氮、速效钾和有效磷含量	[50]
平菇	山杏壳	采用平板扩散法测定不同浓度的木醋液对平菇细菌性褐斑病菌的影响,发现与对照相比,山杏壳木醋液有显著的抑菌效果,且可以促进平菇菌丝生长	[51]
番茄	松树锯末	将木醋液、杀菌剂喷施和根施于番茄生长过程中,发现木醋液与杀菌剂配合施用,提高了杀菌剂对番茄枯萎病、灰霉病的防治效果,达到了减药增效的效果	[52]
	—	将木醋液配施化肥根施土壤,可以提高番茄果实数量、质量、株高和酚类化合物,从而提高番茄产量和抗氧化能力	[53]
辣椒	—	将辣椒种子用木醋液浸种,发现木醋液稀释 250 倍促进辣椒种子萌发和幼苗生长,抑制辣椒专化型病原菌的生长	[54]

2.4 木醋液对其他作物的影响

木醋液可作为叶面肥直接喷施于烟叶叶面,可提高烟叶色素含量、可溶性总糖含量、还原糖含量和烟株农艺性状,有效降低烟叶烟碱含量^[55]。王晓等^[56]研究发现木醋液可以提高土壤酶活性和土壤微生物含量,促进烟株生长。此外,由于木醋液中含有有机酸和苯酚及其衍生物,通过叶面喷施和根部灌施可有效地抑制烟草赤星病和黑胫病的发生,从而增加烟草的产量^[57]。木醋液与其他调节剂配施也能起到很好的效果。曹莹等^[58]评估了木醋液和萘乙酸钠配施对花生光合作用及产量的影响,结果

表明,木醋液和萘乙酸钠配施为植物进行光合作用提供了充足的原料,提高了花生叶片叶绿素含量及花生产量。在人参的应用上,木醋液可以抑制人参黑斑病菌和灰霉病菌的菌丝生长和孢子萌发^[59]。Zhu 等^[60]系统评估了木醋液对油菜的影响,发现与对照处理相比,叶面喷施木醋液提高了油菜产量、叶面积指数和荚果数,降低了油菜菌核病和霜霉病的发病率。荆立奇等^[61]将木醋液应用于棉花的种植,发现其能够促进棉花种子萌发,增加单铃重和总铃数,从而增加棉花的产量,且改善棉花品质。木醋液在其他植物上的增效技术和应用效果见表 5。

表 5 木醋液在其他作物上的增效技术和应用效果

Table 5 Synergistic technology and application effect of wood vinegar on other crops			
植物	木醋液原料	增效技术和应用效果	文献
烟	—	在烤烟打顶后叶面喷施不同浓度木醋液可提高烤烟叶绿素、还原糖和可溶性总糖含量,有效叶片数及叶面积也有所提高,全氮、钾较对照组分别提高了 18.35% 和 30.18%	[55]
	花生壳、桃壳、果木	将不同原料生物醋根施烟苗盆栽中,发现木醋液能够提高土壤酶活性,增加土壤微生物含量,提高土壤脱氢酶、磷酸酶、蔗糖酶及脲酶活性,促进烟株生长	[56]
	—	将不同浓度木醋液在烤烟生长不同时期进行叶面喷施和灌根,与对照组相比,木醋液叶面喷施 500 倍烟叶单叶重增加了 96.39%,木醋液处理能显著改善烟叶的品质,对烟草病毒病、黑胫病和赤星病有良好防治效果	[57]
花生	—	在花生的生长时期喷施不同浓度醋液与萘乙酸钠溶液,发现适宜浓度木醋液与萘乙酸钠溶液复合处理使叶片气孔导度增加,进而增加了摄入二氧化碳的量,提高了叶绿素含量、单株结果数、单株果质量、有效分枝数,增了花生产量	[58]
人参	—	采用菌丝生长速率法和孢子萌发法,研究了木醋液对人参灰霉病菌的影响,发现木醋液的质量分数为 2.25% 及以上时,能够完全抑制人参灰霉病菌的菌丝生长和孢子萌发	[59]

表5(续)			
植物	木醋液原料	增效技术和应用效果	文献
油菜	杨木	将不同浓度木醋液喷施于油菜叶面,与对照处理相比,稀释 400 倍的木醋液处理油菜产量、叶面积指数和单株荚果数平均分别增加 9.58%、23.45% 和 23.8%。此外,稀释 400 倍木醋液处理的菌核病和霜霉病发病率比对照组平均减少了 5.55% 和 4.58%	[60]
棉花	—	在棉花苗期滴灌木醋液,可以提高棉花种子的出苗率,促进棉花生长;同时,在开花期滴灌和喷施木醋液,增加棉花株高和果枝台数,改善棉花品质	[61]
东南景天	废菌底渣	在盆栽土壤表面喷施不同稀释倍数的木醋液,与对照相比,稀释 100 倍木醋液处理显著提高了土壤氮磷钾含量,提高了土壤酶活性,增加了细菌多样性	[62]

3 展 望

我国拥有庞大且丰富的生物质资源,由于木醋液是通过生物质热解产生的,因此木醋液的研究与应用有着巨大潜力。随着不可再生资源的大量消耗以及国家对环保的重视,木醋液作为一种绿色、环保、可降解、无毒害的植物刺激素被广泛应用,对促进作物增产和实现农林业可持续发展具有非常重要的意义。然而,目前在木醋液的制备工艺、国家标准和作用机理等方面仍存在许多问题,因此,需要对以下方面问题进行深入研究:

- 1)探究简单高效木醋液的制备工艺或通过多种制备工艺方法的结合,提高木醋液的活性成分;
- 2)尽快制定国家标准,规范木醋液生产制造的质量,为木醋液研究及应用提供依据;
- 3)评估不同制备工艺和不同原料制备的木醋液在植物上的调节机理和土壤改良机理;
- 4)研究木醋液与农药、植物生长调节剂等配合施用是否具有协同增效的作用;
- 5)探讨木醋液各种成分对植物的作用效果和机理;
- 6)研究不同浓度木醋液对土壤微生物活性影响;
- 7)研究木醋液在不同植物上应用的适宜浓度,探讨喷施与根系施用结合的效果;
- 8)研究木醋液与碱性液体肥料配施效果。

通过上述系统全面的研究,将有助于推动木醋液的开发和高效使用,为绿色农业可持续发展提供参考。

参考文献(References):

[1] WANG L, QIN T, LIU T Q, et al. Inclusion of microbial inoculants with straw mulch enhances grain yields from rice fields in central China[J]. Food and Energy Security, 2020, 9(4): e230. DOI: 10.1002/fes3.230.

[2] ATES A. Role of modification of natural zeolite in removal of manganese from aqueous solutions[J]. Powder Technology, 2014, 264: 86-95. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.05.023.

[3] 张玉凤,刘兆辉,田慎重,等.含木醋液水溶肥对于热风胁迫

下小麦生长的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3): 499-504. DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.03.008.

ZHANG Y F, LIU Z H, TIAN S Z, et al. Effect of water-soluble fertilizer containing wood vinegar on wheat growth under dry-hot wind stress[J]. Soils, 2021, 53(3): 499-504.

[4] 徐海祥,徐稣逸,柯晓俊,等.木醋液复合保鲜膜对鸡蛋保鲜的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(10): 105-112. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2022.10.047.

XU H X, XU S Y, KE X J, et al. Effect of wood vinegar compound preservative film on egg preservation[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(10): 105-112.

[5] 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. DOI: CNKI:SUN:DNYX.0.2010-06-029.

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.

[6] 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. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-201608022.

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.

[7] 王元,翟梅枝,晏婷,等.不同温度段核桃壳木醋液的组分分析及生物活性研究[J]. 西北植物学报, 2011, 31(11): 2321-2327. DOI: CNKI:SUN:DNYX.0.2011-11-033.

WANG Y, ZHAI M Z, YAN T, et al. Chemical compositions and biological activity of pyroligneous acids of walnut shell[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(11): 2321-2327.

[8] 任衍森,马腾,周毅,等.温度对棉花秸秆热解固液相产物特性的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2020, 38(6): 668-674. DOI: 10.13880/j.cnki.65-1174/n.2020.21.029.

REN Y S, MA T, ZHOU Y, et al. Effect of temperature on the properties of solid-liquid products based on cotton stalk pyrolysis[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2020, 38(6): 668-674.

[9] 杨昌炎,姚建中,吕雪松,等.生物质中 K⁺、Ca²⁺ 对热解的影响及机理研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(5): 496-502. DOI: 10.3321/j.issn: 0254-0096.2006.05.016.

YANG C Y, YAO J Z, LÜ X S, et al. Influence of K⁺ and Ca²⁺ on the mechanism of biomass pyrolysis[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2006, 27(5): 496-502.

[10] KARAGÖZ S, BHASKAR T, MUTO A, et al. Effect of Rb and Cs carbonates for production of phenols from liquefaction of wood biomass[J]. Fuel, 2004, 83(17/18): 2293-2299. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.06.023.

[11] 王锐,高明洋,曹景沛.碱/碱土金属催化松木屑快速热解机

- 制[J]. 应用化学, 2022, 39(2): 289-297. DOI: 10.19894/j.issn.1000-0518.210037.
- WANG R, GAO M Y, CAO J P. Effects of alkali/alkaline earth metals on fast pyrolysis of pine sawdust[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2022, 39(2): 289-297.
- [12] 侯宝鑫, 张守玉, 吴光美, 等. 生物质热解制备木醋液及其性质研究[J]. 燃料化学学报, 2015, 43(12): 1439-1445. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2409.2015.12.006.
- HOU B X, ZHANG S Y, WU Q M, et al. Wood vinegar and its properties from pyrolysis of biomass [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2015, 43(12): 1439-1445.
- [13] 史冠昭, 翟梅枝, 毛光瑞, 等. 2种核桃壳木醋液的化学组成及抑菌活性研究[J]. 西北植物学报, 2014, 34(10): 2109-2117. DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.10.2109.
- SHI G Z, ZHAI M Z, MAO G R, et al. Chemical compositions and antifungi activities of pyrolygneous acids from walnut shell of two species [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(10): 2109-2117.
- [14] 冷佳琦. 苹果木木醋液的成分分析及其对韭菜生长的促进作用研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2022.
- LENG J Q. Composition analysis of applewood vinegar and its correlation study on promoting effect of leek growth [D]. Yantai: Yantai University, 2022.
- [15] 陈萍, 邵立兴, 王建刚. 花生壳木醋液有机成分分析[J]. 山东化工, 2017, 46(24): 86-88. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2017.24.036.
- CHEN P, SHAO L X, WANG J G. Analysis on the organic components of wood vinegar from peanut shell [J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(24): 86-88.
- [16] 毛巧芝, 赵忠, 马希汉, 等. 苦杏壳木醋液抑菌活性和化学成分分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 164-170. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1298.2010.02.033.
- MAO Q Z, ZHAO Z, MA X H, et al. Preparation, toxicity and components for bitter almond shell wood vinegar[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 164-170.
- [17] 蒋恩臣, 赵晨希, 秦丽元, 等. 松子壳连续热解制备木醋液试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 262-269. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.05.033.
- JIANG E C, ZHAO C X, QIN L Y, et al. Experiment of wood vinegar produced from pine nut shell continuous pyrolysis [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(5): 262-269.
- [18] 周建斌, 张合玲, 叶汉玲, 等. 几种秸秆醋液组分中活性物质的分析[J]. 生物质化学工程, 2009, 43(2): 34-36. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5854.2009.02.008.
- ZHOU J B, ZHANG H L, YE H L, et al. Analysis of active substances of several kinds of straw vinegar [J]. Biomass Chemical Engineering, 2009, 43(2): 34-36.
- [19] 张宏, 李文珠, 张文标, 等. 2种精制竹醋液组分及含量的分析比较[J]. 竹子研究汇刊, 2014, 33(3): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6567.2014.03.006.
- ZHANG H, LI W Z, ZHANG W B, et al. The composition and content of two kinds of refined bamboo vinegars [J]. Journal of Bamboo Research, 2014, 33(3): 32-37.
- [20] 赵彦巧, 李建颖, 林淑英, 等. 酸枣壳木醋液的精制及保鲜效果研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(15): 152-154, 296. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2014.15.023.
- ZHAO Y Q, LI J Y, LIN S Y, et al. Study on refining of Jujube shell wood vinegar and its preservation effect [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(15): 152-154, 296.
- [21] WU Q M, ZHANG S Y, HOU B X, et al. Study on the preparation of wood vinegar from biomass residues by carbonization process [J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 98-103. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.12.026.
- [22] 许英梅, 高连连, 朴永哲, 等. 不同精制法松树木醋液中生物活性组分的富集[J]. 大连民族学院学报, 2015, 17(3): 207-210. DOI: 10.13744/j.cnki.cn21-1431/g4.2015.03.004.
- XU Y M, GAO L L, PIAO Y Z, et al. Enrichment of bioactive components in pine wood vinegar based on different refining methods [J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2015, 17(3): 207-210.
- [23] 张晶晶, 周楚仪, 吴春香, 等. 不同活性炭对竹醋液的脱色脱臭应用研究[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2012, 32(2): 34-41. DOI: 10.13467/j.cnki.jbuns.2012.02.004.
- ZHANG J J, ZHOU C Y, WU C X, et al. Applications researches on the decolorization and deodorization of bamboo vinegar with different activated carbons [J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2012, 32(2): 34-41.
- [24] 柏明娥, 陈顺伟, 庄晓伟. 不同精制工艺对竹醋液理化性质的影响[J]. 林产化工通讯, 2005, 39(2): 25-27. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5854.2005.02.007.
- BAI M E, CHEN S W, ZHUANG X W. The impact of the different preparation technics on properties of bamboo vinegar [J]. Journal of Chemical Industry of Forest Products (Bimonthly), 2005, 39(2): 25-27.
- [25] LI Z C, ZHANG L N, CHEN G Y, et al. A new method for comprehensive utilization of wood vinegar by distillation and liquid-liquid extraction [J]. Process Biochemistry, 2018, 75: 194-201. DOI: 10.1016/j.procbio.2018.08.012.
- [26] 张文标, 华毓坤, 王伟龙, 等. 高纯度竹醋液生产和加工工艺的研究[J]. 林产化学与工业, 2003, 23(1): 46-50. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-2417.2003.01.011.
- ZHANG W B, HUA Y K, WANG W L, et al. Study on technology of high purity bamboo vinegar production [J]. Chemistry & Industry of Forest Products, 2003, 23(1): 46-50.
- [27] 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. DOI: 10.1016/j.jaap.2009.09.006.
- [28] 尉芹, 马希汉, 郑滔. 核桃壳木醋液的制取、成分分析及抑菌试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 276-279. DOI: 10.3321/j.issn: 1002-6819.2008.07.058.
- WEI Q, MA X H, ZHENG T. Preparation, chemical constituents analysis and antimicrobial activities of pyrolygneous acid of walnut shell [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 276-279.
- [29] 常青, 王永亮, 张强, 等. 木醋液对茄子种子发芽的促进作用[J]. 山西农业科学, 2018, 46(8): 1269-1273. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2481.2018.08.11.
- CHANG Q, WANG Y L, ZHANG Q, et al. Promoting effect of wood vinegar on germination of eggplant seed [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(8): 1269-1273.
- [30] MA C H, SONG K G, YU J H, et al. Pyrolysis process and antioxidant activity of pyrolygneous acid from *Rosmarinus officinalis*

- leaves[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 104: 38-47. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.09.011.
- [31] 卢辛成, 蒋剑春, 何静, 等. 不同萃取剂对木醋液活性组分的富集研究[J]. 林产化学与工业, 2020, 40(2): 76-82. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2417.2020.02.010.
- LU X C, JIANG J C, HE J, et al. Effect of different extraction agents on enrichment of active components from wood vinegar[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2020, 40(2): 76-82.
- [32] 张珊珊. 核桃壳木醋液的生物活性与化学成分研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- ZHANG S S. Biological activities and chemical profiles of pyrolytic acids from walnut shell [D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2010.
- [33] 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. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2020.10.015.
- 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.
- [34] 斯日本极, 孔涛, 郑爽, 等. 木醋液对辽西北低、中肥力土壤小白菜产量和土壤酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 52-57. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.009.
- SIRIMUJI, KONG T, ZHENG S, et al. Effect of wood vinegar on pakchoi yield and soil enzyme activities in low and medium fertility soil in northwest Liaoning Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 52-57.
- [35] 潘洁, 肖辉, 程文娟, 等. 木醋液土壤灌溉对土壤养分、番茄产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(2): 61-64, 77. DOI: 10.11838/sfsc.20160211.
- PAN J, XIAO H, CHENG W J, et al. Effect of wood vinegar on soil nutrient, tomato yield and quality[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016(2): 61-64, 77.
- [36] 马梦瑶, 马红媛, 李绍阳, 等. 木醋液引发对盐胁迫下羊草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(8): 1588-1593. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202207.006.
- MA M Y, MA H Y, LI S Y, et al. Effects of wood vinegar priming on seed germination and seedling growth of *Leymus chinensis* under salt stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(8): 1588-1593.
- [37] 胡世龙, 程博, 曹凑贵, 等. 不同氮肥水平下喷施木醋液对水稻产量和食味品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 133-140. DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.01.012.
- HU S L, CHENG B, CAO C G, et al. Effects of spraying wood vinegar on yield and taste quality of rice under different nitrogen levels[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 133-140.
- [38] SIMMA B, POLTHANEE A, GOGGI A S, et al. Wood vinegar seed priming improves yield and suppresses weeds in dryland direct-seeding rice under rainfed production[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2017, 37(6): 56. DOI: 10.1007/s13593-017-0466-2.
- [39] JEONG K W, KIM B S, ULTRA V U, et al. Effects of rhizosphere microorganisms and wood vinegar mixtures on rice growth and soil properties[J]. The Korean Journal of Crop Science, 2015, 60(3): 355-365. DOI: 10.7740/kjcs.2015.60.3.355.
- [40] 卢辛成, 蒋剑春, 何静, 等. 木醋液对小麦幼苗生长、抗氧化特性及内源激素含量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(7): 7-13.
- LU X C, JIANG J C, HE J, et al. Effects of wood vinegar on seedling growth, antioxidant activity and endogenous hormone content of wheat [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(7): 7-13.
- [41] LU X C, JIANG J C, HE J, et al. Pyrolysis of *Cunninghamia lanceolata* waste to produce wood vinegar and its effect on the seeds germination and root growth of wheat[J]. BioResources, 2019, 14: 8002-8017. DOI: 10.15376/biores.14.4.8002-8017.
- [42] 郭运玲, 董建悦, 张淑红, 等. 木醋液对玉米大斑病菌的抑制作用[J]. 河南农业科学, 2019, 48(1): 90-93. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2019.01.014.
- GUO Y L, DONG J Y, ZHANG S H, et al. Inhibition of wood vinegar on pathogen of northern corn leaf blight, *Setosphaeria turcica*[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(1): 90-93.
- [43] 张传进, 吴人敏, 王帅帅, 等. 施用木醋液甜瓜根系生长及根际土壤生物学性状与细菌多样性变化[J]. 热带作物学报, 2019, 40(7): 1265-1271. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2019.07.003.
- ZHANG C J, WU R M, WANG S S, et al. Change of root growth of muskmelon, soil biological properties and bacterial diversity in rhizosphere under wood vinegar application[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(7): 1265-1271.
- [44] 于红梅, 袁华招, 关玲, 等. 不同浓度的木醋液在高架草莓生产中的应用效果[J]. 安徽科技学院学报, 2020, 34(2): 23-27. DOI: 10.19608/j.cnki.1673-8772.2017.0772.
- YU H M, YUAN H Z, GUAN L, et al. Application effect of wood vinegar in strawberry cultivation under the viaduct cultivation mode[J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2020, 34(2): 23-27.
- [45] 薛桂新, 黄世臣, 宋益冬. 木醋液对桃根霉菌抑菌作用和对久保桃保鲜效果的研究[J]. 延边大学农学院学报, 2013, 35(2): 123-130. DOI: 10.13478/j.cnki.jasyu.2013.02.010.
- XUE G X, HUANG S C, SONG Y D. Study of wood vinegar on inhibition and keeping-fresh effect of *R. nigrican Ehrenbof* peach and *Prunus persica*[J]. Journal of Agricultural Science Yanbian University, 2013, 35(2): 123-130.
- [46] 刘勇, 何华平, 龚林忠, 等. 桃炭疽病原鉴定及木醋液防治研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(24): 6002-6006. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2014.24.026.
- LIU Y, HE H P, GONG L Z, et al. Identifying pathogen of peach anthracnose and controlling it with wood vinegar[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(24): 6002-6006.
- [47] 姚玲, 王东东, 谢民争, 等. 施用木醋液对猕猴桃品质的影响研究[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(9): 19-21. DOI: 10.3969/j.issn.0488-5368.2014.09.006.
- YAO L, WANG D D, XIE M Z, et al. Study on the effect of applying wood vinegar on the quality of kiwi fruit[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2014, 60(9): 19-21.
- [48] 何堂熹, 罗聪, 刘源, 等. 喷施不同浓度木醋液对杧果果实品质的影响[J]. 中国南方果树, 2020, 49(5): 55-59. DOI: 10.13938/j.issn.1007-1431.20190788.
- HE T X, LUO C, LIU Y, et al. Effects of different concentrations of wood vinegar on fruit quality of mango fruit[J]. South China Fruits, 2020, 49(5): 55-59.

- [49] 常青, 王永亮, 杨治平, 等. 木醋液对土壤 pH、EC 与茄子叶片光合特性及根系发育的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 322–328. DOI: 10.13254/j.jare.2019.0057.
CHANG Q, WANG Y L, YANG Z P, et al. Effects of wood vinegar on soil pH, EC, and the photosynthetic characteristics of eggplant leaves and root development[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(3): 322–328.
- [50] 王晓朋, 张红雪, 胡坤, 等. 喷施废菌棒木醋液对小白菜生长和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3): 95–100. DOI: 10.11838/sfsc.1673–6257.19368.
WANG X P, ZHANG H X, HU K, et al. Effect of spraying wood vinegar made from mushroom cultivation wastes on the growth and quality of Chinese cabbage[J]. Soils and Fertilizer Sciences in China, 2020(3): 95–100.
- [51] 徐岩岩, 刘晓光, 彭艳芳, 等. 精制山杏壳木醋液防治平菇细菌性褐斑病药效试验[J]. 北方园艺, 2016(11): 148–150. DOI: 10.11937/bfy.201611039.
XU Y Y, LIU X G, PENG Y F, et al. Effect of refined bitter almond shell pyroigneous acid on brown blotch disease of *Pleurotus ostreatus*[J]. Northern Horticulture, 2016(11): 148–150.
- [52] 肖辉, 程文娟, 张鹏, 等. 木醋液与杀菌剂复配对番茄枯萎病和灰霉病的防治效果[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(1): 82–87. DOI: 10.15889/j.issn.1002–1302.2021.01.015.
XIAO H, CHENG W J, ZHANG P, et al. Control effects of combination of wood vinegar and fungicide on tomato *Fusarium* wilt and gray mold[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(1): 82–87.
- [53] BENZON H R L, LEE S C. Potential of wood vinegar in enhancing fruit yield and antioxidant capacity in tomato[J]. Korean Journal of Plant Resources, 2016, 29(6): 704–711. DOI: 10.7732/kjpr.2016.29.6.704.
- [54] 杜佳燕, 武菊平, 王婧瑶, 等. 木醋液对辣椒种子萌发及其抑菌作用的影响研究[J]. 河北农业大学学报, 2021, 44(1): 91–96. DOI: 10.13320/j.cnki.jauh.2021.0012.
DU J Y, WU J P, WANG J Y, et al. Study of wood vinegar effect on seeds germination of chili pepper and its antibacterial functions[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2021, 44(1): 91–96.
- [55] 毛凯伦, 李司童, 李本晟, 等. 木醋液对南郑烤烟上部叶生长及产质量的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(3): 645–652. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2019.3.030.
MAO K L, LI S T, LI B S, et al. Effect of wood vinegar on growth, yield and quality of upper leaves of flue-cured tobacco of Nanzheng[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(3): 645–652.
- [56] 王晓, 覃青青, 周建云, 等. 生物醋液对土壤改良效果及烤烟生长的影响[J]. 贵州农业科学, 2019, 47(9): 26–29. DOI: 10.3969/j.issn.1001–3601.2019.09.006.
WANG X, QIN Q Q, ZHOU J Y, et al. Effects of biological vinegar on soil improvement and flue-cured tobacco growth[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2019, 47(9): 26–29.
- [57] 邵惠芳, 张慢慢, 刘国庆, 等. 木醋液对烤烟品质和抗病性的影响[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(6): 102–110. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2015.162.
SHAO H F, ZHANG M M, LIU G Q, et al. Effect of pyroigneous acid on tobacco quality and disease-resistant[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(6): 102–110.
- [58] 曹莹, 张贺楠, 孟军, 等. 木醋液与萘乙酸钠复合作用对花生光合特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 185–191, 210. DOI: 10.7606/j.issn.1000–7601.2017.01.28.
CAO Y, ZHANG H N, MENG J, et al. Effects of wood vinegar and sodium naphthalene acetate on photosynthesis and yield of peanut[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 185–191, 210.
- [59] 李翔国, 韩莲花, 吴松权, 等. 木醋液对人参黑斑病菌和人参灰霉病菌的抑菌作用[J]. 中药材, 2014, 37(9): 1525–1528. DOI: 10.13863/j.issn1001–4454.2014.09.004.
LI X G, HAN L H, WU S Q, et al. Inhibition effects of wood vinegar on *Alternaria panax* and *Botrytis cinerea*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2014, 37(9): 1525–1528.
- [60] ZHU K M, GU S C, LIU J H, et al. Wood vinegar as a complex growth regulator promotes the growth, yield, and quality of rapeseed[J]. Agronomy, 2021, 11(3): 510. DOI: 10.3390/agronomy11030510.
- [61] 荆立奇, 马富裕. 木醋液对棉花生长及产量的影响研究[J]. 新疆农垦科技, 2016, 39(1): 41–43. DOI: 10.3969/j.issn.1001–361X.2016.01.019.
JING L Q, MA F Y. Effect of wood vinegar on cotton growth and yield[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2016, 39(1): 41–43.
- [62] ZHOU X Q, SHI A, RENSING C, et al. Wood vinegar facilitated growth and Cd/Zn phytoextraction of *Sedum alfredii* Hance by improving rhizosphere chemical properties and regulating bacterial community[J]. Environmental Pollution, 2022, 305: 119266. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119266.

(责任编辑 李琦)