

基于温度与原料调控的三级冷凝热解液 抑菌性能探究

仇继辉¹, 蒲鹏⁴, 王洋², 曹林林², 廖振良³, 邓辉^{2*}

(1.喀什大学土木工程学院, 新疆工程材料与结构安全重点实验室, 新疆喀什 844008;
2.石河子大学化学化工学院, 新疆兵团环境监测与污染物控制重点实验室, 新疆石河子 832003;
3.同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 4.中核404有限公司, 甘肃酒泉 735000)

摘要:为进一步探究三级冷凝热解液的抑菌性能,在不同热解温度和原料下制备热解液并采用三级冷凝法冷凝,研究其对热解液组分的影响,并探究热解液主要组分与抑菌性能间的关系。结果表明:与常规冷凝相比,三级冷凝降低了热解液中74.30%以上的酚类物质含量;棉秆在500℃下制备的三级冷凝热解液抑菌效果较常规冷凝更强,而以棉秆为原料制备的三级冷凝热解液中,热解温度为400℃时,其抑细菌和真菌中F菌效果均最好,不同原料在500℃下制备的三级冷凝热解液中,核桃壳的三级冷凝热解液抑细菌和真菌效果均最佳;热解液的抑菌性能与菌的种类和热解液组分的共同作用有关。热解温度、生物质原料和冷凝方式均会显著影响热解液成分含量和抑菌性能。

关键词:热解液;原料;热解温度;三级冷凝;抑菌性能

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0273-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.045

Bacteriostatic performance investigation of three-stage condensation pyrolysis liquids based on temperature and raw material regulation

QIU Ji-hui¹, PU Peng⁴, WANG Yang², CAO Lin-lin², LIAO Zhen-liang³, DENG Hui^{2*}

(1.Xinjiang Key Laboratory of Engineering Materials and Structural Safety, School of Civil Engineering, Kashi University, Kashi 844008, China; 2.Xinjiang Production and Construction Corps Environmental Monitoring and Pollution Control Key Laboratory, School of Chemistry and Chemical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 3.College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4.China Nuclear Corporation 404 Co., Ltd., Jiuquan 735000, China)

Abstract:To further investigate the bacteriostatic performance of three-stage condensation pyrolysis liquids, this study prepared pyrolysis liquids under different pyrolysis temperatures and raw materials using three-stage condensation, examining its impact on pyrolysis liquid composition and exploring the relationship between main components and bacteriostatic performance. Results showed that, compared to conventional condensation, three-stage condensation reduced phenolic compound content in pyrolysis liquids by over 74.30%. Pyrolysis liquid derived from cotton stalk at 500℃ exhibited stronger antibacterial effects than conventional condensation; among cotton stalk-derived pyrolysis liquids, the optimal antibacterial and antifungal (against fungus F) effects were achieved at 400℃; among various raw materials pyrolyzed at 500℃, walnut shell-derived pyrolysis liquid demonstrated the best antibacterial and antifungal performance. The bacteriostatic performance of pyrolysis liquids is influenced by both microbial species and pyrolysis liquid composition. Pyrolysis temperature, biomass raw materials, and condensation methods significantly affect the component content and bacteriostatic performance of pyrolysis liquids.

Key words: pyrolysis liquid; raw material; pyrolysis temperature; three-stage condensation; bacteriostatic activity

病原微生物在自然界中广泛存在,可引起农业、食品加工、养殖业、医疗行业等多领域的问题。化学抑菌剂是目前控制以上问题最常用的方法。然而,长期使用化学抑菌剂会导致病原菌对药物的抗药性不断升高,同时这些化学试剂的使用会对高等

动物和环境产生不可修复的损伤。因此,研究开发性能优异、稳定性好的天然绿色抑菌剂迫在眉睫。

热解液是生物质在热解过程冷凝热解气体而得到的具有酸味和烟熏味的液态产物,其主要成分有酸、酚、酮、醛、醇、酯、醚等几大类物质^[1-3]。热解液

收稿日期:2026-03-12;修回日期:2026-03-30

基金项目:喀什大学校级科研项目-盐胁迫下新疆土壤微生物种群的群落结构演化研究(20242931);喀什大学科研启动经费-缺水地区污水再利用水质安全保障技术及控制策略研究(022024426)

作者简介:仇继辉(1994-),男,硕士生,助教,研究方向为化学工程与技术,1169484396@qq.com;邓辉(1979-),女,博士,教授,研究方向为固体废物资源利用,通讯联系人,denghy@126.com。

具有纯天然、污染小、来源广泛等特性,广泛应用于农业、林业、畜牧业、食品、医药卫生等领域^[4-5]。近些年热解液作为抑菌剂的相关研究已成为研究热点。张利亚等^[6]研究发现小麦秸秆粗制热解液对多种病菌均有良好的抑菌性能;张浩宽等^[7]指出不同热解温度下山茱萸果核热解液对大肠杆菌等细菌的抑菌效果不同,其中起主要作用的是酸和酚类物质;而赵淑衡等^[8]的研究表明热解液的抑菌效果是热解液中多种成分共同作用的结果。热解液组分的构成取决于热解温度及生物质原料^[9-10],张一鸣等^[11]提出,热解温度为 450~500℃时,核桃壳热解液中酚类物质含量达到最大。Bordoloi 等^[12]研究了无毛水黄皮和铁梨木热解液的组分,其中正己烷组分分别达到 73%和 61%。上述研究表明,热解液具有良好的抑菌性能,且温度和原料会显著影响热解液的成分,但其对热解液成分和抑菌性能内在的联系尚无统一论。

热解液具有较好的抑菌性能,但常规冷凝制备的热解液中化合物含有大量不饱和键且含氧量较高,易发生聚合和氧化等化学反应而导致其极不稳定。此外,常规冷凝热解液含有酚类等对植物有毒害作用的物质而限制其应用^[13],因此,热解液通常需要精制后使用。Pollard 等^[14]的研究表明,分级冷凝处理以后可有效使乙酸(沸点 118℃)等小分子酸分离,从而提高热解液的稳定性。隋海清等^[15]使用分级冷凝装置收集热解液,0℃和-20℃冷凝装置里富集了 C₂~C₃ 的有机物,碳原子数目较多的酚类等有毒害的物质均被富集在较高温度段。因此高温段的产物可作为工业燃料使用,而低温段含有大量水分和小分子有机酸^[16]。

三级冷凝法是热解液精制的新方法,根据热解气中各组分冷凝温度的不同,将不同的组分富集在不同的温度段中,从而实现小分子酸类物质与重质组分的分离,提高稳定性的同时还可以脱除酚类等有毒有害物质,使其可应用于更多领域。本课题组之前的研究^[17]也表明三级冷凝热解液中酚类物质含量显著降低,并对盐碱土有良好的改良效果。但目前有关三级冷凝对热解液抑菌性能影响的研究有待丰富。同时,热解温度和原料的差异会影响三级冷凝热解液组分和性质,而这方面的研究目前仍较为欠缺,其抑菌性能尚不十分明确。

本文以棉秆、核桃壳、花生壳、玉米芯为原料,探究不同热解温度对三级冷凝精制热解液组分及抑菌效果的影响,为热解液的综合利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

原料:实验以棉秆及其主要组分差异较大的核桃壳、花生壳、玉米芯为原材料,生物质由石河子大学化学化工学院固体废弃物研究室提供。将棉秆剪碎为 2~3 cm 的小段,花生壳、核桃壳和玉米芯均掰碎成约 2~3 cm 的碎片,最后均在 105℃烘箱中烘干 4 h 后装入密封袋备用。生物质主要组分测定参照刘侠等^[18]的方法,不同生物质组分分析如表 1 所示。

表 1 生物质组分分析*

样品名称	纤维素质量分数/%	半纤维素质量分数/%	木质素质量分数/%	灰分/%	含水率/%
棉秆	37.92±	17.90±	13.13±	5.87±	7.38±
	8.75a	0.90c	1.98d	0.30b	0.01a
核桃壳	29.17±	19.02±	27.29±	1.63±	5.38±
	5.42c	1.78b	2.83a	0.43d	0.07c
花生壳	30.70±	11.61±	22.71±	6.06±	5.47±
	3.75b	3.56d	6.25b	0.15a	0.04b
玉米芯	23.19±	20.57±	18.55±	2.04±	5.17±
	4.75d	3.38a	5.01c	0.24c	0.03d

注:*表中 a、b、c、d 为所占百分比大小排列顺序等级。

热解液的制备:热解液由石河子大学固体废弃物研究室自制反应釜制得,实验装置与具体操作方法与课题组前期报道一致^[17]。本实验共使用棉花秸秆、玉米芯、核桃壳、花生壳 4 种生物质原料,放入反应釜密封后以 0.3 L/min 的氮气吹扫速度持续通入 30 min。根据课题组前期棉秆三级冷凝热解实验结果^[17],设置棉秆热解温度为 400、500℃和 600℃ 3 个梯度,不同生物质热解温度设置为 500℃,热解时间均为 1 h。一、二、三级冷凝温度分别设置为 180、120℃和 0℃,常规冷凝热解液仅设置 0℃的单级冷凝装置。热解液被标识为生物质-n,n 表示热解温度,如棉秆-5 表示棉花秸秆在 500℃下三级冷凝的热解液;常规冷凝热解液的编号在生物质类型前面加*,如*棉秆-5 表示棉花秸秆在 500℃下常规冷凝的热解液。

1.2 常规冷凝与三级冷凝热解液抑菌实验

1.2.1 供试菌

细菌大肠杆菌(*Escherichia coli*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*,*S. aureus*)由石河子大学食品学院提供。病害真菌尖镰孢萎蔫专化型

(*Culture of Fusarium oxysporum f.*) 和立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani*) 均在中国农业微生物菌种保藏管理中心购买,分别用 F 菌和 R 菌表示。

1.2.2 抑菌实验

细菌和真菌的抑制实验分别采用滤纸片法和生长速率法^[19]。抑菌实验均以无菌水为对照,同时每组做 3 个平行实验。细菌抑制率根据式(1)计算,真菌抑制率根据式(2)计算。

$$\text{细菌抑制率} = [(\text{处理组抑菌圈直径} - \text{空白组抑菌圈直径}) / \text{处理组抑菌圈直径}] \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{真菌抑制率} = [(\text{空白组菌落直径} - \text{处理组菌落直径}) / \text{空白组菌落直径}] \times 100\% \quad (2)$$

再以热解液浓度与对应的抑菌率为坐标轴做毒性回归方程,以获得半数抑制浓度 EC_{50} 。

1.3 技术路线

技术路线如图 1 所示。

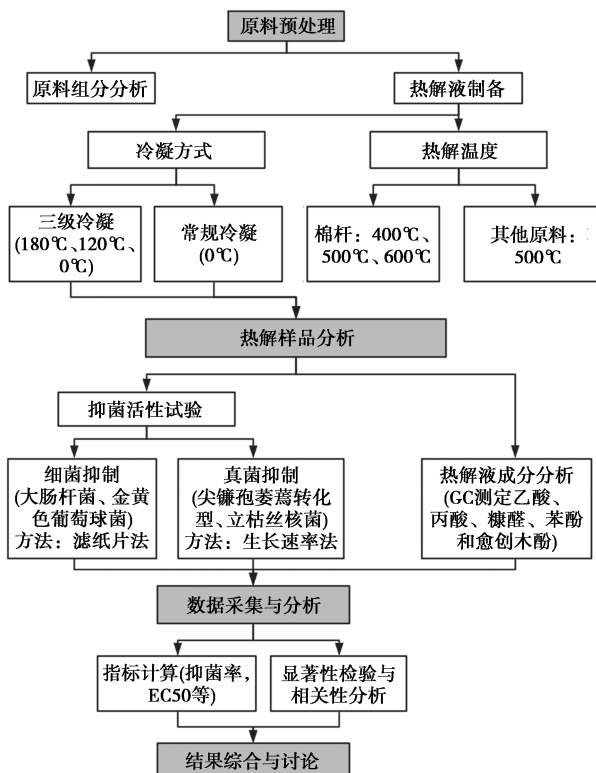


图 1 技术路线

1.4 热解液成分分析

课题组^[17,20]前期研究表明,热解液主要的有机物质有乙酸、丙酸、糠醛、苯酚和愈创木酚等,故本研究中采用气相色谱仪(2014C,日本岛津公司)分析热解液中上述有机成分含量。所用标准色谱柱为 HP-5 型,气相色谱法(GC)条件为:色谱柱为 HP-INNOWAX(30 m×0.25 mm×0.25 μm);以 1 mL/min

氮气为载气;进样温度 260℃;分流比 20:1;柱箱初始温度为 50℃,保持 3 min,然后以 4℃/min 升温至 250℃,并保持 15 min。

1.5 统计与分析

使用 SPSS 分析软件 IBM Statistics SPSS 24 进行显著性分析和 Pearson 相关性分析($P < 0.05$),图在 Origin 2021 中绘制。

2 结果与讨论

2.1 热解温度、生物质原料和三级冷凝对热解液产率和成分的影响

本实验分别研究了棉秆在 500℃ 下的常规冷凝和三级冷凝热解液的产率、成分,以及棉秆在 400、500、600℃ 下的三级冷凝热解液产率、成分,同时也研究了核桃壳、花生壳、玉米芯在 500℃ 下的三级冷凝热解液产率、成分,具体结果和分析如下。

2.1.1 产率

由图 2 可以看出:三级冷凝热解液的产率明显低于常规冷凝热解液。不同热解温度(400℃、500℃ 和 600℃)下,棉秆三级冷凝热解液的产率随温度的升高而升高,这是由于当热解温度较低时,棉秆热解反应进行不充分,随着热解温度的升高,棉秆中更多纤维素和木质素等物质的化学键断裂形成更多小分子物质,使三级冷凝热解液产率增加。这与李艳美等^[9]常规冷凝热解棉秆 500℃ 时产率最高的结果有差异,500~600℃ 棉秆热解可能产生较多小分子物质被三级冷凝装置收集。比较相同温度下(500℃)4 种不同生物质的三级冷凝热解液产率,棉秆-5 组的产率最高。生物质的 3 种主要组分中,纤维素热解会产生较少的固体残留物和较多的气相和液相产物^[21]。由表 1 可知,棉秆纤维素含量最高,故其在 500℃ 热解条件下三级冷凝热解液得率最高。此外,由表 1 与图 2 结合可知,三级冷凝热解液的产率与生物质木质素的含量呈负相关($P < 0.05$),

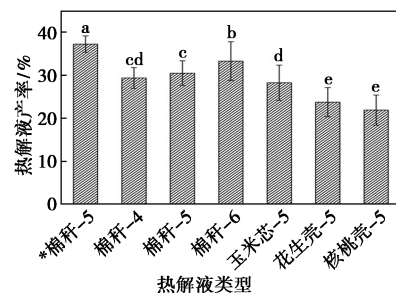


图 2 热解温度及生物质原料对三级冷凝热解液产率的影响

这是因为木质素有较宽的热解温度范围^[22],同时由于其自身的芳香结构,热解过程中很容易发生稠环化和焦化反应,从而产生大量固体残渣,使得气相和液相产物的产率较低^[23-24]。

2.1.2 成分分析

由表 2 热解液主要组成成分可知:三级冷凝会显著降低热解液中酚类物质的含量,这是因为通过一、二级冷凝,热解气中大量的酚类重质组分被富集^[15,24],酚类物质含量降低 74.30% 以上。三级冷凝对热解液乙酸含量的影响不大,它占三级冷凝和常规冷凝热解液主要有机组分的 75.42% 以上。乙酸的沸点为 118℃,不会在一、二级冷凝装置中富集。棉秆在不同温度下制备的三级冷凝热解液中,酚类物质含量随热解温度的升高逐渐增加,这是因为木质素在较高温度下分解更加充分。此外,半纤维素失重范围为 200~400℃,但棉秆-5 组乙酸含量最高,这可能是因为半纤维素与其余 2 种组分共同热解时相互影响,导致半纤维素热解温度范围扩大至 500℃,而 600℃ 时部分乙酸可能重新聚合成新的化合物,从而导致乙酸含量出现先升后降的趋势。相同热解温度下(500℃),4 种生物质三级冷凝热解液组分有显著差异($P < 0.05$)。玉米芯-5 组中糠醛含量高达 9.34 mg/mL。玉米芯的戊聚糖含量可达

表 2 热解温度及生物质原料对三级冷凝热解液成分含量的影响*

物质	乙酸/ (mg·mL ⁻¹)	丙酸/ (mg·mL ⁻¹)	糠醛/ (mg·mL ⁻¹)	愈创木酚/ (mg·mL ⁻¹)	苯酚/ (mg·mL ⁻¹)
* 棉秆-5	33.97d	2.56b	2.26d	1.63a	3.58a
棉秆-4	27.36e	2.36d	1.55f	0.18f	0.48d
棉秆-5	39.11a	2.40c	2.14e	0.24e	0.73c
棉秆-6	27.69e	1.71f	1.03g	0.27de	0.92b
花生壳-5	37.78b	2.77a	4.37b	0.33c	0.17e
核桃壳-5	34.86c	2.01e	2.88c	0.28d	0.14e
玉米芯-5	37.73b	2.42c	9.34a	0.39b	0.15e

注: * 表中 a、b、c、d、e 为所占百分比大小排列顺序等级。

35%,对于合成糠醛有一定优势。值得注意的是,花生壳中半纤维素含量最低,但花生壳-5 中半纤维素热解代表性产物乙酸的含量却仅次于棉秆-5 组,可能是花生壳的灰分含量高,其中的碱金属可能对半纤维素的分解有一定的催化作用。

2.2 三级冷凝热解液的抑菌活性分析

本文分别对不同热解温度、不同生物质原料下的三级冷凝热解液的抑细菌、抑真菌效果进行了研究分析,以下分别介绍。

2.2.1 三级冷凝热解液对细菌的抑菌效果及分析

由表 3 可知:常规冷凝和三级冷凝热解液对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均有优异的抑菌效果,抑菌率最高可达 82.63% 和 75.26%。其中棉秆-5 组对两种细菌的抑制性能均比 * 棉秆-5 组强,半数抑制浓度 EC_{50} 可分别减小 46.15% 和 9.62%,有研究表明热解液抑菌性能与乙酸、丙酸等酸类物质含量正相关^[7,19],而三级冷凝的棉秆-5 组中乙酸含量较常规冷凝的 * 棉秆-5 的高,因此抑菌性能更好。不同热解温度制备的棉秆三级冷凝热解液对两株细菌的抑菌性有显著性差异($P < 0.05$),其中棉秆-4 组对两株细菌的抑制效果最好, EC_{50} 分别为 0.12% 和 0.39%。相同温度下(500℃)不同生物质制备的三级冷凝热解液对两种细菌的抑制性也均有显著性差异($P < 0.05$),其中以核桃壳-5 组抑制细菌的性能最好, EC_{50} 分别为 0.19% 和 0.47%。玉米芯-5 组对金黄色葡萄球菌抑制效果最差,原因可能是玉米芯热解液中糠醛含量较多所致,张浩宽等^[7]指出,热解液抑菌性能与糠醛质量浓度呈反比。同一热解液对两种细菌表现出不同的抑制性,本研究中热解液对大肠杆菌的 EC_{50} 在 0.12%~0.21% 之间,而金黄色葡萄球菌的 EC_{50} 在 0.39%~0.47% 之间,表明热解液对大肠杆菌抑制效果更强,因为革兰氏阳性菌金黄色葡萄球菌的细胞壁含有致密的肽聚糖层,可起到一定的保护作用。

表 3 热解温度及生物质原料对三级冷凝热解液细菌抑制效果的影响*

菌种	热解液	原液抑菌圈直径/mm	抑菌率/%	回归方程	相关系数	$EC_{50}/\%$
大肠杆菌	* 棉秆-5	29.33±0.67	77.54	$y=0.23x+0.73$	0.99	0.39b
	棉秆-4	25.75±0.63	76.70	$y=0.14x+0.79$	0.91	0.12e
	棉秆-5	29.08±0.92	79.37	$y=0.21x+0.83$	0.88	0.21d
	棉秆-6	26.42±1.09	77.29	$y=0.15x+0.80$	0.88	0.14e
	花生壳-5	18.78±0.42	68.05	$y=0.22x+0.61$	0.66	0.61a
	核桃壳-5	34.55±0.55	82.63	$y=0.23x+0.89$	0.85	0.19d
	玉米芯-5	27.89±0.59	78.49	$y=0.25x+0.82$	0.95	0.28c

续表

菌种	热解液	原液抑菌圈直径/mm	抑菌率/%	回归方程	相关系数	$EC_{50}/\%$
金黄色葡萄球菌	* 棉秆-5	16.83±0.90	64.35	$y=0.21x+0.64$	0.98	0.52c
	棉秆-4	20.17±0.51	70.25	$y=0.23x+0.72$	0.94	0.39e
	棉秆-5	17.92±0.37	66.52	$y=0.27x+0.70$	0.87	0.47d
	棉秆-6	24.25±1.09	75.26	$y=0.32x+0.78$	0.93	0.41e
	花生壳-5	15.42±0.67	61.09	$y=0.21x+0.59$	0.97	0.64b
	核桃壳-5	23.42±0.20	74.38	$y=0.33x+0.75$	0.99	0.47d
	玉米芯-5	11.83±0.31	49.28	$y=0.42x+0.15$	0.89	0.84a

注: * 表中 a、b、c、d、e 为所占百分比大小排列顺序等级。

2.2.2 热解液对真菌抑菌效果及分析

如表4所示,常规冷凝和三级冷凝热解液对R菌和F菌均有良好的抑菌效果, EC_{50} 均在0.74%以下。由表4可知:*棉秆-5组对真菌的抑制效果较棉秆-5组强,原因是酚类物质与抑菌性能呈正相关^[7]。如表2所示,三级冷凝热解液酚类物质含量显著降低。值得注意的是,该结果与细菌抑制结果相反,因为抑制细菌和真菌的机制和物质有所差异。不同热解温度下制备的三级冷凝热解液对R菌的

抑制效果无明显差异;但对于F菌,棉秆-4组抑制效果最佳,其半数抑制浓度约0.25%,同时随着热解温度的升高三级冷凝热解液抑菌性能会逐渐下降。相同热解温度(500℃)下不同生物质制备的三级冷凝热解液中核桃壳-5组对两种病害菌的抑制效果最佳,当体积浓度为0.31%时对F菌的抑菌率仍可达到50.00%左右。三级冷凝热解液对F菌的半数抑制浓度 EC_{50} 均明显小于R菌,说明F菌对其中的组分更加敏感。

表4 热解温度及生物质原料对三级冷凝热解液真菌抑制效果的影响*

菌种	热解液	菌落直径/mm	抑菌率/%	回归方程	相关系数	$EC_{50}/\%$
立枯丝核菌	* 棉秆-5	51.83±1.40	19.85	$y=0.80x+0.12$	0.97	0.48d
	棉秆-4	50.00±1.28	15.57	$y=0.83x-0.11$	0.94	0.73a
	棉秆-5	53.17±2.01	17.70	$y=0.84x-0.11$	0.96	0.73a
	棉秆-6	54.33±1.34	12.83	$y=0.82x-0.10$	0.95	0.74a
	玉米芯-5	39.50±0.54	30.30	$y=0.73x+0.21$	0.77	0.55c
	花生壳-5	48.50±0.78	19.78	$y=0.77x+0.02$	0.99	0.61b
	核桃壳-5	24.50±0.90	56.77	$y=0.87x+0.12$	0.97	0.42e
尖镰孢萎蔫专化型	* 棉秆-5	38.17±0.68	54.94	$y=0.48x+0.24$	0.84	0.54b
	棉秆-4	28.33±0.27	60.23	$y=0.51x+0.37$	0.94	0.25c
	棉秆-5	39.67±2.01	52.75	$y=0.61x+0.13$	0.72	0.59a
	棉秆-6	40.17±0.45	45.56	$y=0.78x+0.04$	0.91	0.57ab
	玉米芯-5	26.00±0.37	63.51	$y=0.55x+0.42$	0.68	0.13d
	花生壳-5	23.00±0.59	67.72	$y=0.37x+0.47$	0.75	0.08e
	核桃壳-5	23.33±0.56	67.25	$y=0.38x+0.51$	0.95	0.03f

注: * 表中 a、b、c、d、e 为所占百分比大小排列顺序等级。

2.3 热解液主要组分与抑菌性能的关系

为进一步探究热解液主要组分与以上供试菌种抑菌性能间的关系,本研究对热解液主要组分的浓度与供试菌种 EC_{50} 作皮尔逊相关性分析,正相关性越强,表明该组分抑制效果越弱。如图3所示,乙酸和丙酸浓度与大肠杆菌 EC_{50} 均呈现中度正相关关系,其余组分均呈现低度甚至极弱正相关,故乙酸和丙酸对大肠杆菌抑制效果弱;乙酸浓度与金黄色葡萄球菌 EC_{50} 为0.55,呈现中度正相关;同时,糠醛浓

度与金黄色葡萄球菌 EC_{50} 为0.97,为高度正相关,故糠醛对金黄色葡萄球菌的抑制性能较差;热解液主要组分与R菌 EC_{50} 均呈现负相关,但均处于低度和极弱水平;F菌 EC_{50} 与糠醛浓度呈现中度负相关,与苯酚呈现中度正相关,其余均呈现低度和极弱相关。

综上,热解液的抑菌效果并不是某种组成物质起到决定性作用,而是热解液中各组分共同作用的结果。

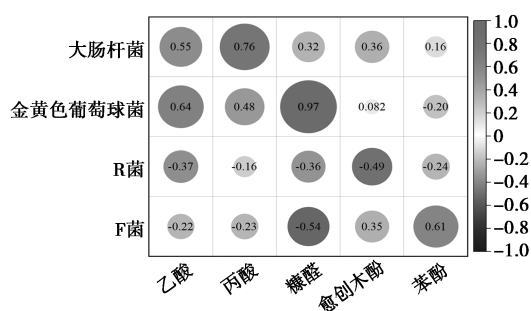


图 3 热解液主要组分与抑菌性能相关性分析

3 结论

热解液有作为抑菌剂的巨大潜能,本文研究了不同生物质原料、热解温度对三级冷凝热解液成分及抑菌性能的影响。

(1)与常规冷凝热解液相比,三级冷凝热解液产率显著下降($P < 0.05$),实现了酚类大分子物质的分离(酚类物质含量降低 74.30%以上);而随热解温度升高三级冷凝热解液产率增加,与生物质组分中木质素含量呈负相关。

(2)抑菌实验结果表明,棉秆在 500℃ 下常规冷凝和三级冷凝热解液对供试细菌和真菌均有优异的抑制效果,但三级冷凝热解液对细菌抑制效果较常规冷凝热解液更强,抑菌率最高达 82.63%, EC_{50} 最低至 0.12%,主要原因是三级冷凝热解液中酸类物质(如乙酸)的富集;在 400℃ 下制备的棉秆三级冷凝热解液对细菌和真菌中的 F 菌抑制最优, EC_{50} 分别为 0.12%(大肠杆菌)和 0.25%(F 菌);在热解温度为 500℃,不同原料的三级冷凝热解液中,以核桃壳为原料时的三级冷凝热解液抑真菌和细菌效果最佳,细菌和真菌的 EC_{50} 均较低(如 F 菌为 0.03%);玉米芯因糠醛含量高,对金黄色葡萄球菌抑制较弱,但对 F 菌抑菌率达 63.51%。

(3)热解液主要组分与抑菌性能相关性结果表明,热解液各组分对供试菌种的抑制均没有起决定性作用,故热解液具有优异的抑菌性能是其各组分共同作用的结果。

参考文献

- [1] 王龙杰,张春友,周岭,等.不同热解工艺条件对枣枝木醋液特性的影响[J].塔里木大学学报,2025,37(5):55-66.
- [2] 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.
- [3] 刘长风,张功领,张晓宇,等.精制杂木木醋液成分分析及其抑菌活性研究[J].食品科技,2020,45(2):311-317.
- [4] Ahmadi P, Avesta M J, Khorrarnel S, et al. Production and use of

lignocellulosic wood vinegar and tar as organic pesticides to fight bacterial canker disease [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 301: 140373.

- [5] 刘润宇,叶乐夫,王雪,等.木醋液在农业病虫草防控中的应用研究进展[J].中国农学通报,2020,36(35):113-118.
- [6] 张利亚,刘霞,张佩.小麦秸秆木醋液成分及抑菌效果研究[J].江苏农业科学,2020,48(18):219-222.
- [7] 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.
- [8] 赵淑薇,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.
- [9] 李艳美,柏雪源,易维明.3种不同原料生物油主要化学成分的GC-MS分析[J].山东科学,2016,29(1):56-61.
- [10] 何明明,景亮晶,李瑞,等.4种不同原料生物油的主要化学组分分析[J].可再生能源,2010,28(6):103-105.
- [11] 张一鸣,马善为,朱谢飞,等.核桃壳热解分级冷凝产物分布特性研究[J].太阳能学报,2021,42(1):365-370.
- [12] Bordoloi N, Narzari R, Chutia R S, et al. Pyrolysis of Mesua ferrea and Pongamia glabra seed cover: Characterization of bio-oil and its sub-fractions [J]. Bioresource Technology, 2014, 178: 83-89.
- [13] Hwang Y H, Matsushita Y I, Sugamoto K, et al. Antimicrobial effect of the wood vinegar from Cryptomeria japonica sapwood on plant pathogenic microorganisms [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2005, 15(5): 1106-1109.
- [14] Pollard A S, Rover M R, Brown R C. Characterization of bio-oil recovered as stage fractions with unique chemical and physical properties [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012, 93: 129-138.
- [15] 隋海清,李攀,王贤华,等.生物质热解气分级冷凝对生物油特性的影响[J].化工学报,2015,66(10):4138-4144.
- [16] 韩平,蒋恩臣,王明峰,等.生物油分级冷凝研究进展[J].农业机械学报,2016,47(5):164-170.
- [17] 曹林林,任衍森,邓辉,等.棉秆热解分级冷凝产物改良盐碱土效果[J].农业工程学报,2022,38(22):158-165.
- [18] 刘侠,温俊峰,焦玉荣,等.废弃果核壳中纤维素、半纤维素和木质素含量的测定[J].榆林学院学报,2022,32(2):6-9.
- [19] Ma X, Wei Q, Zhang S, et al. Isolation and bioactivities of organic acids and phenols from walnut shell pyrolytic acid [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011, 91(2): 338-343.
- [20] 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.
- [21] Zheng A, Li L, Zhao Z, et al. Effect of torrefaction pretreatment on chemical structure and pyrolysis behaviors of cellulose [J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021, 621: 12-14.
- [22] Fan Y, Cai Y, Li X, et al. Effects of the cellulose, xylan and lignin constituents on biomass pyrolysis characteristics and bio-oil composition using the Simplex Lattice Mixture Design method [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 138: 106-118.
- [23] Brebu M, Tamminen T, Spiridon I. Thermal degradation of various lignins by TG-MS/FT-IR and Py-GC-MS [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 104: 531-539.
- [24] Bu Q, Lei H, Zacher A H, et al. A review of catalytic hydrodeoxygenation of lignin-derived phenols from biomass pyrolysis [J]. Biore-source Technology, 2012, 124: 470-477. ■