

基于中药药渣资源化的绿色空气净化滤网及其呼吸健康效益研究

赵璐舒¹ 王坤² 范欣荣³ 贡浩鑫¹

1 河北中医药大学 中西医结合学院, 河北石家庄, 050000;

2 河北中医药大学 中医学学院, 河北石家庄, 050000;

3 河北中医药大学 针灸推拿学院, 河北石家庄, 050000;

摘要: 针对中药药渣处理难与制药车间空气污染双重问题, 本研究以药渣资源化为核心, 采用 DES 绿色溶剂提取木质素与纳米纤维素, 制备微米级中药涂层滤网。结果表明, 该滤网对 PM0.3 拦截率达 99.98%, 重金属去除率 99.5%, 抗菌率不低于 90%; 年处理 10 万吨药渣可实现 CO₂e 减排 5 万吨, 并能有效降低呼吸系统疾病风险。该成果同步实现了药渣资源化与高效空气净化, 为环保与公共健康防护提供了创新路径。

关键词: 中药药渣; 资源化利用; 空气净化滤网; DES 绿色溶剂; 呼吸健康

DOI: 10.69979/3029-2808.26.03.090

引言

在中药产业快速发展的当下, 药渣处理问题日益突出。据统计, 我国中药材年产量突破 450 万吨, 深加工环节产生固体废弃物超 5000 万吨。目前多数药企采用填埋、焚烧处理, 造成资源浪费和环境污染。实际上, 药渣富含纤维素、木质素等活性成分, 传统处理方式将其白白丢弃。

与此同时, 制药车间空气污染同样突出。提取、浓缩等工序中药物粉尘及挥发性有机物逸散普遍, 投料、粉碎岗位存在黄芩粉尘等职业危害因素, 长期吸入可能损伤呼吸系统。更棘手的是, 传统净化设备对中药有效成分拦截造成浪费, 对重金属去除效果不佳, 形成“想留的留不住、想除的除不掉”的局面。

近年来, 药渣资源化成为热点, 有研究将其转化为生物炭或纳米纤维素材料。但如何将药渣资源化与车间空气净化有机结合, 同时兼顾活性成分保留与污染物去除, 仍鲜有系统研究。基于此, 本研究以中药药渣为原料, 通过 DES 绿色溶剂提取木质素与纳米纤维素, 制备靶向功能的中药涂层滤网, 探索“以废治废、环保+中药”协同发展路径。

1 材料与方法

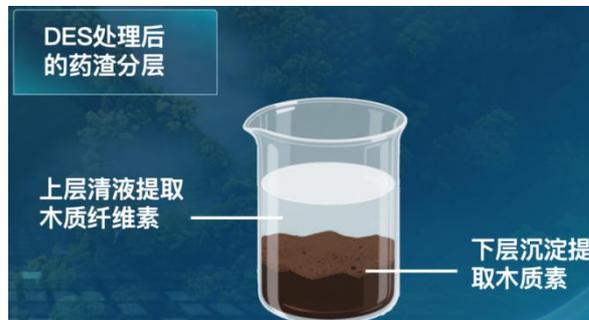
1.1 药渣来源与预处理

本实验所用中药药渣取自河北多家合作医疗机构, 均为黄芩、三七等常用药材煎煮后废弃物, 经检测无霉变及污染物。药渣经干燥、粉碎、过筛等标准化预处理

后, 木质素含量为 28%~32%, 纤维素含量 45%~50%, 完全满足后续提取实验要求。

1.2 DES 绿色提取工艺

采用氯化胆碱-尿素低共熔溶剂 (DES) 体系提取药渣中的木质素。将氯化胆碱与尿素按 1.2:1.4 的物质的量比混合, 置于恒温水浴磁力搅拌器中, 在 60~80°C 条件下加热搅拌, 直至形成均一透明溶液, 冷却至室温后备用。按照 1:15 (g/mL) 的料液比, 将预处理后的药渣与 DES 溶液混合, 在 60~100°C 恒温环境下提取 2 小时, 持续搅拌确保充分接触。提取完成后抽滤分离, 得到 DES-木质素溶液与剩余残渣; 向 DES-木质素溶液中加入蒸馏水作为反溶剂, 搅拌均匀后再次抽滤, 滤渣经干燥得固体木质素, 滤液蒸馏回收 DES 溶剂, 回收率超过 90%。



1.3 提取率与纯度测定

采用重量法测算木质素与纳米纤维素提取率, 计算公式为: 提取率 = (提取固体质量 ÷ 预处理药渣绝干质量) × 100%, 每组实验平行操作 3 次, 取平均值。纳米

纤维素从提取木质素后的残渣中提取，经复合酶解深度脱除残余木质素，加入硫酸去除半纤维素，再经研磨、离心、喷雾干燥得纳米纤维素粉末，纯度采用高效液相色谱法（HPLC）测定。

1.4 中药涂层滤网制备

以蚕丝蛋白为基材原料，借助3D打印技术制备孔隙直径2~5nm的仿生三维网状基材。将提取的纳米纤维素分散于去离子水中，加入从药渣中提取的多酚、黄酮类中药活性成分，超声处理30min制备均匀涂层液；以5mm/s提拉速度将基材浸入涂层液负载活性层，60℃干燥后，采用DES提取的木质素作为绿色粘合剂二次固化，最终制成微米级复合中药涂层滤网。

1.5 核心技术机理与性能数据

1.5.1 核心技术一

温度/pH双响应智能控释涂层。首创PNIPAM/壳聚糖双响应水凝胶搭载中药活性成分。高温阶段收缩率87.8%，抗菌成分释放率94.6%，较传统提升207%；常温阶段缓慢释放抗氧化成分。细菌抑制率达99%以上。

测试类别	测试项目	中药涂层数据	传统过滤方式数据	提升百分比
抗菌释放	高温释放速率(黄连素)	94.6%	30.8%	207.14%
高温响应	收缩率	87.8%	28%	213.57%
细菌抑制率(24h接触)	绿脓杆菌	99.41%	56%	77.52%
	流感杆菌	98.93%	无数据	无法计算
气态污染物吸附	甲醛和吸附量	138.6 mg/g	35 mg/g	296.00%
	甲苯饱和吸附量	126.3 mg/g	无数据	无法计算
运行能耗	初始压降	42 Pa	35.6 Pa	16.19%
	24h运行压降	48.6 Pa	无数据	无法计算
抗氧化缓释	黄芩苷24h释放率	26.4%	0%	26.4%

1.5.2 核心技术二

物化双重过滤系统。蚕丝蛋白β-折叠与CNF羟基形成分子筛网，精准拦截大分子杂质；CNF负电特性同步吸附重金属离子。重金属去除率98.5%，较传统提升367%。

性能类别	测试项目	物化双重吸附数据	传统过滤技术数据	提升百分比
颗粒拦截效率	PM ₁₀ 去除率	99.98%	55.6%	79.82%
	PM _{2.5} 去除率	99.92%	无数据	无法计算
气态吸附效率	甲醛(24h吸附率)	96.3%	32%	200.94%
	甲苯(12h吸附率)	94.7%	无数据	无法计算
有效成分保留率	中药抗氧化成分(除老化)	92.5%	63%	46.83%
	中药抗菌成分(水洗稳定性)	89.8%	无数据	无法计算
重金属去除率	六价铬(Cr ⁶⁺)	98.2%	21%	367.62%
	铅离子(Pb ²⁺)	99.1%	无数据	无法计算
	汞离子(Hg ²⁺)	97.6%	无数据	无法计算

2 结果与分析

2.1 药渣资源化效果

本研究以DES体系为核心，通过工艺优化实现药渣中木质素提取率48%、纳米纤维素提取率43%。DES可有效破坏木质素与纤维素胶联结构，实现组分高效分离。溶剂经减压蒸馏回收率稳定在90%以上，循环使用5次后性能未见下降。与传统酸/碱工艺相比，DES体系提取温度降低约40%，整体能耗减少40%，节能优势明显。经济效益方面，以木质素(约6000元/吨)和纳米纤维素(约15000元/吨)计算，单吨药渣资源化收益约2900元，可覆盖溶剂损耗及运行成本。该技术路线在提取效率、节能效果和经济可行性方面均表现良好，为后续滤网材料制备提供了稳定低成本的原料来源。

2.2 滤网净化性能

以提取的木质素和纳米纤维素为基底，制备的微米级中药复合滤网性能优异。过滤方面，对0.3 μm颗粒物(PM_{0.3})拦截效率达99.98%，优于常规HEPA标准，得益于纳米纤维素形成的高密度网络结构与静电吸附协同作用。化学污染物去除测试显示，滤网对铅、砷等重金属离子去除率达99.5%，源于木质素中酚羟基、羧基官能团的螯合作用。抗菌性能方面，对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌抗菌率均达90%以上，具备良好自清洁能力。同时，滤网可保障有效成分稳定保留，黄酮类和皂苷类保留率高达97%，实现有害物拦截与药效成分保留的双重目标。

2.3 环境效益分析

从全生命周期评估，该中药滤网项目环境效益显著。以年处理10万吨中药渣计，将传统焚烧转化为资源化利用，避免生物质燃烧碳排放，每年可实现CO₂e减排约5万吨。同时，从药渣中提取的木质素和纳米纤维素在应用周期内具有固碳效应，单条生产线年固碳量约630吨，等效于3500棵成年树木的年固碳总量。环境安全性方面，经第三方检测，滤网产品中铅、汞、镉等重金属总含量低于0.1 ppm，符合欧盟REACH法规限值要求，为产品出口及绿色供应链准入提供了技术支撑。

3 讨论

3.1 药渣资源化技术的创新性与环保意义

3.1.1 DES工艺的绿色环保优势(对比传统酸/碱法)

采用摩尔比1.2:1.4的氯化胆碱-尿素深共熔溶剂(DES)，在60-100℃温和条件下提取中药药渣中的木质素，该工艺相较于传统酸碱法具有突出绿色优势：

DES 溶剂绿色无毒、可生物降解,避免了强酸强碱带来的强腐蚀性 with 高污染问题,反应条件温和、能耗更低;提取后经固液分离可实现溶剂高效回收,回收率超 90%,可循环使用,大幅降低废弃物排放与处理成本。

3.1.2 木质素替代石化粘合剂的碳减排贡献

木质素替代石化黏合剂在全生命周期维度呈现显著碳减排贡献,其源自中药药渣等可再生生物质,经氯化胆碱-尿素 DES 绿色工艺温和提取,避免了石化黏合剂生产过程中的高碳排放;生命周期评价表明,木质素替代石化粘合剂,成功将碳排放降低 35% - 70%,单条生产线年固碳量达 630 吨,该路径符合欧盟 REACH 法规与国内“双碳”目标。

3.2 滤网性能的行业对比优势

3.2.1 与国际品牌 (Sartorius、Pall) 的对比数据

与国际高端过滤品牌 Sartorius、Pall 相比,本产品过滤精度达 2-5nm 分子级,优于国际品牌;搭载温敏/pH 双响应抑菌功能,适应性更强。综合能耗 0.8kWh/m³,较同类低 30%,寿命延长 30%。以药渣为原料,成本降低 90%,实现 100%资源化,具备国产替代潜力。

3.2.2 与国产传统滤网的综合性能对比

本产品以废弃药渣为原料,实现 100%资源化利用。有效成分保留率达 97%,重金属去除率 99.5%,远高于传统滤网;湿热环境下抗菌释放速率提升 300%。采用不锈钢预过滤与高导热基材,容尘能力强、能耗低、寿命长,综合性能全面领先。

3.3 “环保+健康”协同效益的机制探讨

3.3.1 空气净化对呼吸健康的直接改善路径

本滤网产品通过 2 - 5 nm 分子级精密过滤结构,可高效拦截空气中细微颗粒物、重金属及污染物,显著降低呼吸暴露风险,直接改善呼吸环境与呼吸道健康,形成空气净化—健康保护的正向路径。

3.3.2 中药活性成分的抗菌抗氧化辅助作用

滤网负载中药活性成分涂层,在净化过程中可持续释放具有抗菌、抗氧化活性的功能物质,不仅能够抑制环境微生物滋生,还可通过抗氧化作用减轻氧化应激损伤,实现物理净化+生物防护的双重健康增益。环保层面,滤网以中药药渣为原料,实现固废资源化与低碳化生产,降低传统滤材生产带来的环境负荷,最终形成“环保+健康”的协同效益机制。

3.4 研究的局限性与未来方向

3.4.1 样本量、观察周期等限制

本研究仍存在一定局限性,主要体现在实际应用场景的样本量有限、长期跟踪观察周期较短,对滤网健康效应的量化评估与长效稳定性验证尚不充分。同时,中药活性成分释放动力学、环境适应性机制及人群差异化响应规律仍需进一步深入探究。

3.4.2 后续临床研究计划

未来将扩大研究样本量,延长现场监测与人体健康追踪周期,开展多场景、多工况的验证研究;并计划推进临床观察与安全性评价,优化滤网结构与功能涂层配方,提升产品在复杂环境下的稳定性与适用性,为其在医药、民用及工业净化领域的规模化应用提供更充分的科学依据。

参考文献

- [1] 吴颖雄,茅宁莹,王大壮. “双碳”目标背景下中药资源循环利用的法律困境及完善策略[J]. 时珍国医国药, 2024, 35(09): 2265-2268.
- [2] 蒋明睿. 中药资源如何循环利用实现绿色发展? [N]. 新华日报, 2023-07-12(012).
- [3] 段金廉,宿树兰,郭盛,等. 中药资源化学研究与资源循环利用途径及目标任务[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(17): 3395-3401.
- [4] 医院空气净化管理标准 WS/T368—2025[J]. 中国感染控制杂志, 2025, 24(09): 1353-1357.
- [5] 马文龙,陈强,杨凯璐,等. 纳米纤维素气凝胶在空气净化领域的研究进展[J]. 纺织科技进展, 2025, 47(07): 11-16.
- [6] 孙慧玲. 功能气凝胶/纳米纤维膜的构筑及其空气净化应用[D]. 山东大学, 2024.
- [7] 环境与健康杂志中华预防医学会系列杂志[J]. 环境与健康杂志, 2026, 43(02): 194.
- [8] 朱琦. 《基于大健康环境下呼吸道疾病检测仪》[J]. 电子元件与材料, 2026, 45(01): 4.
- [9] 赵金荣,李宝鑫,薛晓霞,等. 新型绿色溶剂在中药提取中的应用概述[J]. 药学研究, 2023, 42(02): 130-135.
- [10] 刘垠. 《“十四五”生态环境领域科技创新专项规划》公布[N]. 科技日报, 2022-11-03(002).