



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：基于汽爆秸秆全组分利用的结壳型抑尘剂、可发酵糖及木质素钾肥联产
作者：李宝涛，张博，李文慧，隋文杰，司传领，王冠华
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20260011
收稿日期：2026-01-13
网络首发日期：2026-09-02
引用格式：李宝涛，张博，李文慧，隋文杰，司传领，王冠华. 基于汽爆秸秆全组分利用的结壳型抑尘剂、可发酵糖及木质素钾肥联产[J/OL]. 天津科技大学学报. <https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20260011>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20260011

基于汽爆秸秆全组分利用的结壳型抑尘剂、可发酵糖及木质素钾肥联产

李宝涛¹, 张 博¹, 李文慧¹, 隋文杰², 司传领¹, 王冠华¹

(1.天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457; 2.天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 采用蒸汽爆破(汽爆)对玉米秸秆进行预处理, 经筛网筛分得到的短纤维+水洗液组分与助剂复配制备抑尘剂; 长纤维组分进行酶解得到可发酵糖; 其酶解残渣则通过氧碱处理转化为木质素钾肥。在 1.75 MPa, 30 min 汽爆条件下, 秸秆汽爆总回收率达 89.4%; 所制备的短纤维+水洗液组分抑尘剂(羧甲基纤维素钠 5%)在 50 g/m² 喷洒量下, 抗压强度为 650 kPa, 抗风蚀性为 100%, 展现出优异的抗压、防风性能; 长纤维组分在 50 °C、pH 5.5、酶解 48 h 的条件下酶解, 纤维素酶解率超过 92%; 将酶解残渣与 KOH 溶液置于高压反应釜, 在 1 MPa O₂、150 °C 条件下反应 2 h, 反应液干燥后得木质素钾肥, 所得木质素钾肥钾含量 14.1%, 且对玉米幼苗的促生效果显著优于对照钾肥。全工艺物料衡算表明, 1 吨秸秆可联产抑尘剂 576.7 kg、可发酵糖(葡萄糖+木糖) 150.0 kg、木质素钾肥 184.7 kg, 为玉米秸秆的全量化、高值化利用提供了一条可行的技术路径。

关键词: 玉米秸秆; 蒸汽爆破; 组分分离; 抑尘剂; 木质素钾肥; 全量化利用

中图分类号: O636; S147

文献标志码: A

Co-Production of Crust-forming Dust Suppressant, Fermentable Sugars and Lignin-Based Potassium Fertilizer Based on Full-Component Utilization of Steam Exploded Corn Stover

LI Baotao¹, ZHANG Bo¹, LI Wenhui¹, SUI Wenjie², SI Chuanling¹, WANG Guanhua¹

(1. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300072, China)

Abstract: Corn stover were pretreated using steam explosion. The short fibers and water washing liquid fraction obtained through screening were combined with additives to prepare dust suppressants; the long fiber fraction was enzymatically hydrolyzed to obtain fermentable sugars; the enzymatic residues were converted into potassium lignin fertilizer through oxidative-alkaline treatment. Under steam explosion conditions of 1.75 MPa for 30 minutes, the total recovery rate of the stover reached 89.4%. The dust suppressant prepared from the short fiber and washing liquid fraction (with 5% carboxymethyl cellulose sodium addition) showed a compressive strength of 650 kPa and wind erosion resistance of 100% at a spraying rate of 50 g/m²; demonstrating excellent compression and wind erosion resistance performance. The long fiber fraction was enzymatically hydrolyzed under conditions of 50 °C, pH 5.5, for 48 hours, achieving a cellulose hydrolysis rate of over 92%. The enzymatic residues were then reacted with KOH solution in a high-pressure reactor under 1 MPa O₂ and 150 °C for 2 hours. After drying, the reaction liquid yielded potassium lignin fertilizer with a potassium content of 14.1%, which

收稿日期: 2026-01-13; 修回日期: 2026-03-18

基金项目: 全国重点实验室开放基金项目 (SKL-NFBET-2025-22)

作者简介: 李宝涛(1999-), 男, 陕西汉中, 硕士研究生; 通信作者: 王冠华, 研究员, ghwang@tust.edu.cn

significantly promoted the growth of corn seedlings compared to traditional potassium fertilizers. The overall material balance of the process showed that 1 ton of stover could co-produce 576.7 kg of dust suppressant, 150.0 kg of fermentable sugars (glucose and xylose), and 184.7 kg of potassium lignin fertilizer, providing a feasible technical pathway for the full utilization and high-value use of corn stover.

Key words: corn stover; steam explosion; component separation; dust suppressant; lignin potassium fertilizer; full utilization

随着全球对可持续发展和循环经济理念的深入探索,农业废弃物的资源化利用已成为解决资源短缺与环境污染双重挑战的关键路径之一^[1]。在我国,玉米秸秆作为产量巨大的农业副产物,其传统处理方式如田间焚烧或简单粉碎还田,不仅导致资源的严重浪费,而且引发了大气污染、土壤结构破坏等一系列环境问题^[2-3]。玉米秸秆主要由纤维素、半纤维素和木质素三大组分构成,是一种天然可再生的生物质资源^[4]。然而,玉米秸秆天然结构中这三大组分结合紧密,严重影响各组分的高效分离及高值利用^[5]。因此,突破秸秆组分分离的技术瓶颈,实现其全组分综合利用,是有效提高玉米秸秆附加值、推动农业循环经济的重要途径。

蒸汽爆破(汽爆)技术具有高效、环保及易于放大的优点,已广泛应用于生物化工领域,例如大麻脱胶、废弃皮革氧化脱铬,以及秸秆预处理发酵生产燃料乙醇、氢气和沼气等^[6-7]。作为一种物理化学协同作用的预处理方式,汽爆能够通过高温高压蒸汽瞬间释压的物理化学作用,有效破坏玉米秸秆致密的纤维结构,促进纤维素、半纤维素与木质素的分离^[8-10]。基于此,本研究采用蒸汽爆破技术对秸秆进行预处理,进而通过筛分获得以长纤维组分及短纤维+水洗液组分,分别将短纤维与水洗液用于制备可降解结壳型抑尘剂,将长纤维酶解糖化联产木质素钾肥,实现组分的高效分离及高值转化。对所得产品的性能进行系统表征与应用效果评估,并对整体工艺流程开展物料衡算与经济性分析,为玉米秸秆的高值化资源利用提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

玉米秸秆采自山东德州,自然风干粉碎后备用。纤维素酶,诺维信(中国)生物技术有限公司;甲酸、乙酸、浓硫酸、氢氧化钾、氯化钾、羧甲基纤维素钠(CMC),分析纯,天津市江天化工技术股份有限公司;Hoagland 营养液(缺钾配方),湖南霍格兰生物工程有限公司;商业黄腐酸钾(FA-K)、腐殖酸钾

(HA-K),山东田当家生态农业科技有限公司;葡萄糖(色谱纯)和木糖(色谱纯)、木质素磺酸钠(分析纯),上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 蒸汽爆破与组分分离

使用蒸汽爆破设备(QBS-2008 型),在不同压力与维压时间下对玉米秸秆(2~5 cm)进行汽爆处理。汽爆完成后,使用 10 倍于秸秆质量的蒸馏水清洗回收汽爆物料,经 5 mm 筛网分离得长纤维(>5 mm)和短纤维+水洗液组分。总回收率为长纤维组分绝干质量、短纤维组分绝干质量、水洗液蒸发至干的质量之和与汽爆前秸秆绝干质量之比。短纤维+水洗液组分得率与长纤维组分得率分别以其绝干质量占汽爆前秸秆绝干质量百分比计算。

玉米秸秆样品经粉碎机粉碎 5~10 s,用于扫描电子显微镜观察的汽爆后长纤维样品直接从筛分后的组分中取样。样品在恒温鼓风干燥箱中干燥后,粘贴于导电粘合剂碳带上,用溅射涂布机将它们固定并涂覆薄金层,使用扫描电子显微镜于真空、5 kV 的加速电压环境下进行微观结构观察。

1.3 抑尘剂的制备与性能表征

将已知固含量的汽爆秸秆短纤维+水洗液,加入蒸馏水调节至短纤维与水洗液固含量为 1%,使用多功能电动搅拌器使纤维分散均匀,该混合液体即为可降解结壳型抑尘剂。将其以 50 g/m² 定量喷洒于标准沙盘($\Phi=100$ mm),50 °C 烘 2 h 后测定其抗压强度(推力计)、抗风蚀性能(30 m/s 风速吹蚀 10 min,计算沙土保留率)及成膜形态。

1.4 长纤维酶解及酶解渣制备木质素钾肥

长纤维在 50 °C、pH 5.5、纤维素酶用量 15 FPU/g、底物浓度 2%的条件下酶解 48 h。根据 NREL 法^[11]分析汽爆玉米秸秆长纤维的化学组成,包括纤维素、半纤维素、木质素的含量。将酶解残渣与 KOH 溶液(KOH 用量占酶解渣的 22%)置于高压反应釜,1 MPa O₂、150 °C 反应 2 h,反应液干燥后得木质素钾肥,随后通过电感耦合等离子体质谱法^[12]测定其钾含量。

1.5 钾肥植物效应评估

以玉米幼苗为模型作物,向缺钾 Hoagland 营养液中添加 K⁺质量浓度为 100 mg/L 的木质素钾肥

(LPF), 以商业黄腐酸钾(FA-K)、腐殖酸钾(HA-K)、氯化钾(KCl)为阳性对照(K^+ 质量浓度一致), 空白(CK)为缺钾处理。取萌发状态一致的玉米种植于水培盒中培养, 水培盒放置于恒温恒湿植物培养箱中, 植物光源为冷光灯, 温度 $25\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $(70\pm 5)\%$, 光/暗周期为 $16\text{ h}/8\text{ h}$ 。每个处理设置 3 组平行。

培养 15 d 后测定株高、根长、生物量、叶绿素、可溶性蛋白与糖含量。将 0.5 g 新鲜叶片切成小块, 加入 10 mL 95%乙醇, 在黑暗环境下提取 24 h。采用紫外分光光度计测定提取液在 665、649、470 nm 波长处的吸光度, 计算叶绿素浓度^[13]。采用考马斯亮蓝法^[13]测定幼苗叶片中可溶性蛋白质的含量。采用蒽酮比色法^[13]测定幼苗叶片中可溶性糖的含量。

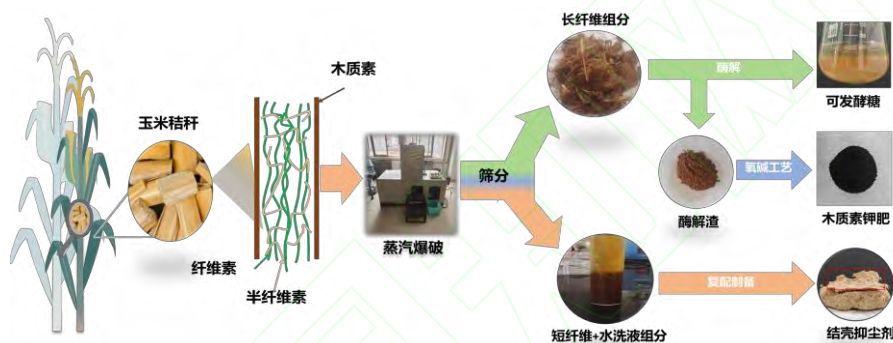


图 1 汽爆预处理玉米秸秆的综合利用

Fig. 1 Comprehensive utilization of corn straw pretreated by steam explosion

汽爆压力与维压时间对玉米秸秆长短纤维组分分离效果的影响如图 2 所示。由图 2 (a) 可知, 当维压时间为 30 min 时, 汽爆压力从 1.0 MPa 升至 2 MPa 时, 短纤维+水洗液组分产量增加, 长纤维质量降低。这是因为随着汽爆压力的升高, 蒸汽渗透效率与瞬间泄压过程中对纤维的机械剪切力增强, 部分长纤维被剪切为短纤维, 从而显著提高短纤维+水洗液组分产率^[14]。由图 2 (b) 可知, 当汽爆压力为 1.75 MPa 时, 维压时间从 10 min 延长至 40 min 时, 长纤维质量大幅减少, 短纤维+水洗液组分得率增加。这是由于维压时间的延长使高温蒸汽更充分渗透至物料内部, 木质素软化、半纤维素降解增加, 促进纤维素解离, 在泄压过程中更多的被切割为短纤维^[15-16]。在汽爆过程中, 高温高压蒸汽首先促使玉米秸秆的半纤维素发生水解。与此同时, 高温使半纤维素中的乙酰基脱落生成乙酸, 从而形成酸性环境并进一步加速水解反应。此外, 在水解中产生的木糖等单糖组分会在高温下脱水、环化, 转化为糠醛。该物质在高温下易挥发, 并在后续泄压过程中随气体排出, 最终导致汽爆料回收

2 结果与讨论

2.1 蒸汽爆破组分的分离

汽爆预处理玉米秸秆利用工艺流程如图 1 所示。取绝干质量的玉米秸秆置于汽爆罐中, 控制汽爆压力与维压时间, 对玉米秸秆进行蒸汽爆破处理。蒸汽爆破处理完成后, 用蒸馏水清洗回收的汽爆产物, 经筛网对汽爆产物进行筛分, 分别得到短纤维+水洗液组分、长纤维组分。将短纤维+水洗液组分用来制备可降解结壳抑尘剂, 长纤维组分用纤维素酶酶解后得到可发酵糖, 其酶解渣经氧碱处理后制备为木质素钾肥。

率的下降^[17-19]。

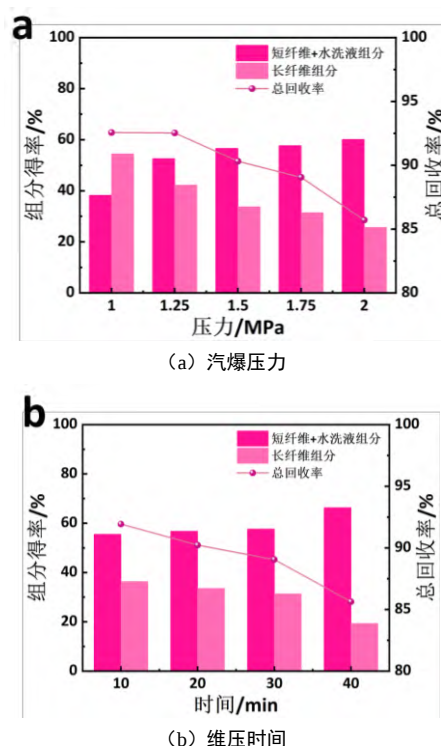


图2 汽爆压力与维压时间对玉米秸秆长短纤维组分分离效果的影响

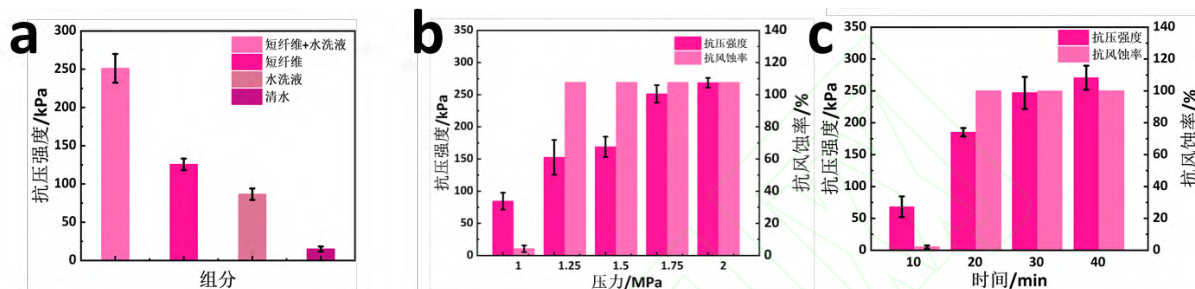
Fig. 2 Effect of steam explosion pressure and holding time on the separation of long and short fiber components of corn stover

2.2 结壳型抑尘剂的制备与性能

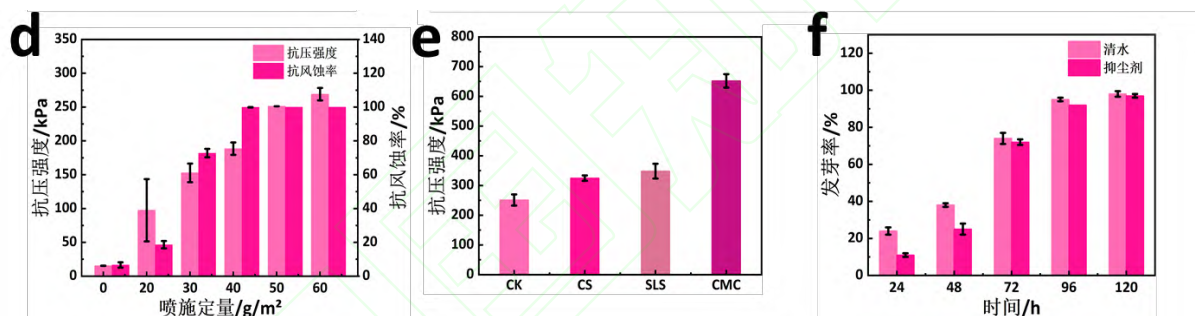
基于短纤维的成膜性, 直接将分散在水洗液中的短纤维制备抑尘剂。结壳型抑尘剂的制备条件与性能分析如图3所示。

由图3(a)可知, 清水对照组(CK)的抗压强

度仅为15.0 kPa, 当喷洒纯水洗液组分时, 其抗压强度提升至86.6 kPa, 这是由于水洗液中由纤维素和半纤维素降解产生的可溶性多糖具有一定的粘结作用, 增强了抑尘剂的抗压强度。单独使用短纤维组分时, 其抗压强度达到了125.6 kPa, 这是因为其纤维之间的相互作用以及自身的成膜性具有一定的抗压能力。当将短纤维与水洗液复配使用时(短纤维+水洗液组分), 其抗压强度显著提升至251.2 kPa。这说明短纤维与水洗液中的溶解性组分之间存在显著的协同增效作用, 最终使抑尘剂的抗压性能倍增。



(a) 短纤维与水洗液组分对抑尘剂抗压性能的影响 (b) 汽爆压力对抑尘剂抗压与抗风蚀性能的影响 (c) 维压时间对抑尘剂抗压与抗风蚀性能的影响



(d) 喷洒定量对抑尘剂抗压与抗风蚀性能的影响 (e) 添加助剂种类对抑尘剂抗压性能的影响 (f) 培养时间对种子发芽率的影响



(g) 50g/m 喷洒定量抑尘剂的成膜性 (h) 喷洒清水 5 d 后种子生长状态 (i) 喷洒抑尘剂 5 d 后种子生长状态

图3 结壳型抑尘剂的制备条件与性能分析

Fig. 3 Preparation conditions and performance analysis of shell-type dust suppressant

由图3(b)可知: 抑尘剂的抗压性能随着汽爆压力的增加而增加, 汽爆压力达到1.75 MPa时, 抗压强度为250 kPa, 抗风蚀率达到100%; 当汽爆压力提升至2 MPa时, 抗压强度进一步提升至270 kPa, 但汽爆物料回收率降低至85.7%。由图3(c)可知, 随着维压时间的延长, 抑尘剂的抗压强度与抗风蚀强度也随之增强。这主要是因为随着汽爆条件增加, 短

纤维汽爆水洗液中溶出的糖类使组分与纤维间、纤维与纤维间相互作用, 纤维间力学性能增强^[20]。当汽爆条件超过一定强度(压力>1.75 MPa, 维压时间>30 min)后, 抑尘剂抗压性能的提升速率明显放缓, 汽爆物料回收率也随之降低。这主要是由于汽爆造成的物料部分转化有机酸或糠醛等物质挥发损失, 以及爆破后物料的回收损失。因此, 选取1.75 MPa、30 min

为最优汽爆条件, 在此条件下制备的抑尘剂总回收率为 89.4%, 抗压强度达 250 kPa, 抗风蚀强度为 100%。

由图 3 (d) 可知: 在汽爆压力 1.75 MPa、维压时间 30 min 条件下, 由短纤维+水洗液组分制备的抑尘剂在不同喷施定量的条件下抗压与抗风蚀性能可看出, 抑尘剂抗压与抗风蚀性能随着喷施定量的增加而增加。相对于当仅喷洒清水时 15 kPa 的抗压强度, 喷洒定量为 20 g/m³ 抑尘剂的抗压强度为 100 kPa, 抗风蚀性能达 18.61%; 喷洒定量提升至 40 g/m³ 时, 抗压强度为 188 kPa, 抗风蚀性能达到 99.89%; 当喷施定量大于 50 g/m³ 时, 抗压强度达 250 kPa, 其抗风蚀性能达到 100%, 这时抗压强度提升趋于平缓。综合抗压与抗风蚀性能指标, 取 50 g/m³ 作为抑尘剂喷施定量, 此时抗压强度高达 250 kPa, 抗风蚀性能达 100%。

为进一步提升抑尘剂抗压与防风性能, 引入成膜助剂增强纤维间的结合力, 从而提升抑尘剂整体的壳膜强度与力学性能。由图 3 (e) 可知: 添加 5% CMC 的抑尘剂抗压强度达 650 kPa, 抗压效果较无助剂提升 160%, 提升效果相较于各处理组最为明显。这是由于 CMC 分子链上的官能团能与纤维体系成分形成氢键和离子键, 增强分子间作用力, 进而大幅提升抑尘剂壳膜强度^[21]。

综上所述, 通过蒸汽爆破 (1.75 MPa, 30 min) 与筛网筛分将玉米秸秆分为长纤维、短纤维+水洗液组分, 并用短纤维+水洗液组分 (喷施定量 50 g/m³) 为原料, 复配 5% CMC (相对于含水抑尘剂), 制备了一款抗压、防风性能优异的结壳型抑尘剂。

为评价抑尘剂对植物种子萌发的影响, 进一步验证了麦草在覆有上述抑尘剂 (图 3 (g)) 的土壤中的萌发情况。将草种子置于种植土表面后盖上 0.2 mm 细土, 以喷洒抑尘剂作为实验组, 喷洒同体积清水作为对照组进行植物种子培养实验, 培养过程中观察种子萌发生长状况。种子在培育 2 d 后, 实验组麦草发芽率明显低于对照组, 但在经培养 5 d 后两者最终发芽率无显著差异 (图 3 (f))。这是因为抑尘剂喷洒后在沙土表面形成一个坚硬的膜壳, 种子萌发初期, 抑尘剂对种子的萌发有一定延缓作用, 萌发时间变长。观察麦草种子萌发状态 (图 3 (h) 和图 3 (i)) 发现, 两处理组麦草最终生长状态良好无差异。这表明抑尘剂形成的物理覆膜仅短暂延缓了种子萌发时间, 对种子萌发并无影响, 具备良好的环境相容性。

2.3 长纤维酶解及酶解渣制备木质素钾肥

汽爆前后纤维的扫描电镜图和 pH、温度与酶解时间对纤维素酶解效果的影响以及酶解后酶解渣及其组分如图 4 所示。

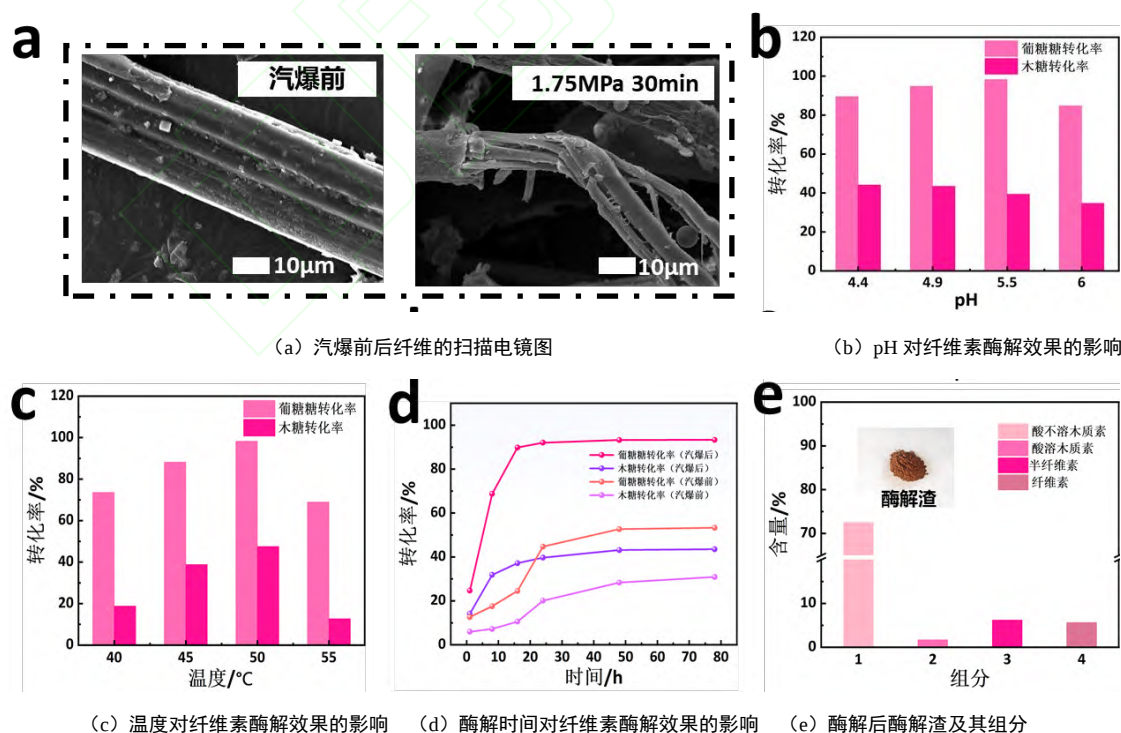


图 4 汽爆前后纤维的扫描电镜图和 pH、温度与酶解时间对纤维素酶解效果的影响以及酶解后酶解渣及其组分

Fig. 4 Scanning electron microscope images of fibers before and after steam explosion, effects of pH, temperature and enzymatic hydrolysis time on cellulose hydrolysis, hydrolyzed residue and its components after enzymatic hydrolysis

由图 4 (a) 可知: 汽爆前秸秆纤维保持致密完整的表面结构; 在优化条件 (1.75 MPa、30 min) 下汽爆后, 玉米秸秆结构破坏性变强, 原本致密的纤维变得蓬松, 汽爆处理后纤维表面产生裂隙和孔洞, 比表面积增大, 更多的酶接触位点暴露出来, 极大地消除酶的空间位阻效应, 从而提高酶解效率^[22-23]。

由图 4 (b) 可知: 当酶水解反应 pH 为 5.5 时, 纤维酶解率达到相对最高值, 这是因为酶的活性受 pH 的影响, 过酸或过碱都会使酶的活性中心结构改变, 影响催化效率。由图 4 (c) 可知: 当酶解温度为 50 °C 时, 纤维素酶解效率最高。这是因为温度能影响酶的活性, 适宜温度下酶活性高, 反应速率快, 温度过低酶活性不足, 过高温度则可能使酶变性失活, 影响纤维素酶解。由图 4 (d) 可知: 在最佳酶促反应条件下, 与未经汽爆的玉米秸秆相比, 在反应速度和总酶解率方面, 汽爆玉米秸秆长纤维均有极为明显的优势, 纤维素酶解率提升了 30% 以上, 这说明蒸汽

爆破预处理是促进秸秆酶解的有效方式。

由图 4 (e) 可知: 酶解渣中含 72% 的木质素, 此外还有少量的纤维素与半纤维素残余。通过单因素实验优化酶解条件, 在底物浓度 2%、纤维素酶用量为 15 FPU/g、50 °C、pH 5.5 条件下反应 48 h, 纤维素酶解率高达 92%。酶解残渣中主要组分为木质素, 其中还有残余的纤维素及半纤维素。氧化解聚能够使木质素的 β -O-4 键断裂, 木质素分子量显著下降, 同时木质素的羟基、羧基等极性基团增加, 水溶性提高^[24], 从而实现木质素的分离利用。对长纤维酶解后的酶解渣进行氧碱处理制备木质素钾肥, KOH 用量占酶解残渣的 22%, 此条件下反应残渣质量仅占酶解残渣的 12.6%, 钾含量达 14.1%。

图 5 展示了以农业上常用的氯化钾、腐殖酸钾、黄腐酸钾等钾肥作为阳性对照, 以不含钾营养液作为空白对照, 研究了木质素钾肥对玉米幼苗生长发育的影响。

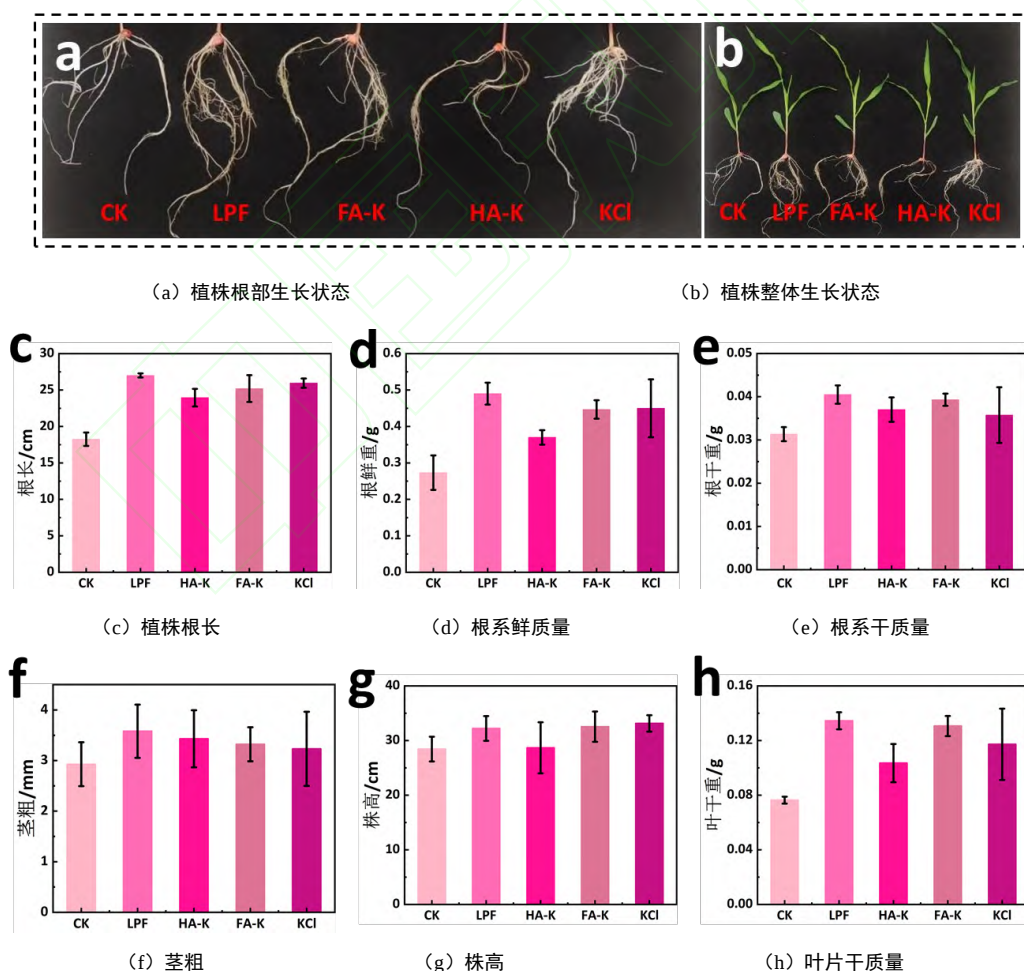


图 5 植株根部生长状态与植株整体生长状态以及不同肥料培养条件下植株根长、根系鲜质量、根系干质量、茎粗、株高与叶片干质量

Fig. 5 Plant root growth status and overall plant growth status, as well as growth indicators including root length, root fresh

weight, root dry weight, stem thickness, plant height, and leaf dry weight under different fertilizer cultivation conditions

由图 5 (a) 可知: 各钾肥处理组根部生长状态均优于 CK 处理组。进一步通过根长、根系鲜质量及根的干质量的定量分析, 明确不同钾肥对幼苗根部生长的影响 (图 5 (c) —图 5 (e))。在根长方面, 木质素钾处理组根长达比 CK 组显著提升 44.4%, 同时也高于腐殖酸钾、黄腐酸钾及氯化钾处理组。木质素钾处理组的根系鲜质量较 CK 组提升 60.7%, 与黄腐酸钾和氯化钾相当, 但高于腐殖酸钾。木质素钾处理组根系干质量较 CK 组提升 33.3%, 且在所有钾处理中保持最高, 其余依次为黄腐酸钾、腐殖酸钾和氯化钾处理组。上述结果表明, 木质素钾肥能够促进植物根系生长, 且效果优于常见商业钾肥。

由图 5 (b) 可知: 施用钾肥的各处理组玉米幼苗整体长势优于 CK 组。进一步通过茎粗、株高及叶片干质量的定量分析明确不同钾肥对幼苗生长的影响 (图 5 (f) —图 5 (h))。在茎粗方面, 木质素钾处理组表现最优, 相较于 CK 组提升约 22.6%, 同时也高于腐殖酸钾、黄腐酸钾及氯化钾处理组。在株高方面, 木质素钾处理组显著高于 CK 组, 并与黄腐酸钾和氯化钾处理组相当, 但优于腐殖酸钾。在叶干重方面, 木质素钾处理组较 CK 组提高 100%, 且在所有处理组中最高。木质素钾显著促进了植物地上部分

的生长, 这不仅体现在增强植株光合作用, 还表现为叶片中干物质的加速积累。相较于黄腐酸钾, 木质素钾在促进植物生长方面表现出更优的效果。这可能是氧化后的木质素, 不仅能结合钾离子, 而且能通过刺激细胞分裂促使植物生长, 同时小分子木质素可能改善金属离子在生长介质中的流动性, 增加金属营养物质向根表面的扩散, 增加植物对钾离子及其他营养物质的生物利用度, 提升肥料的利用率提升^[25-27]。综上所述, 木质素钾在植物的茎、叶生长过程中均发挥着积极作用, 对植物的促生长效果显著。

图 6 展示了不同肥料培养条件下对玉米幼苗生理指标的影响。

由图 6 (a) 可知: 在可溶性蛋白含量方面, CK 组仅为 (3.04 ± 0.07) mg/g, 而木质素钾处理组达到 (6.29 ± 0.06) mg/g, 植物可溶性蛋白含量较 CK 组提升了 100%, 与腐殖酸钾、黄腐酸钾处理组相当, 但显著高于 KCl 组。可溶性蛋白主要由植物体内参与各种代谢的酶类组成, 钾元素作为植物体内多种酶的活化剂, 参与蛋白质合成的多个步骤, 如氮素的吸收、转运和同化等。木质素钾肥在提升玉米幼苗可溶性蛋白含量方面表现出与腐殖酸钾、黄腐酸钾相似的显著效果, 能够有效促进可溶性蛋白的合成与积累。

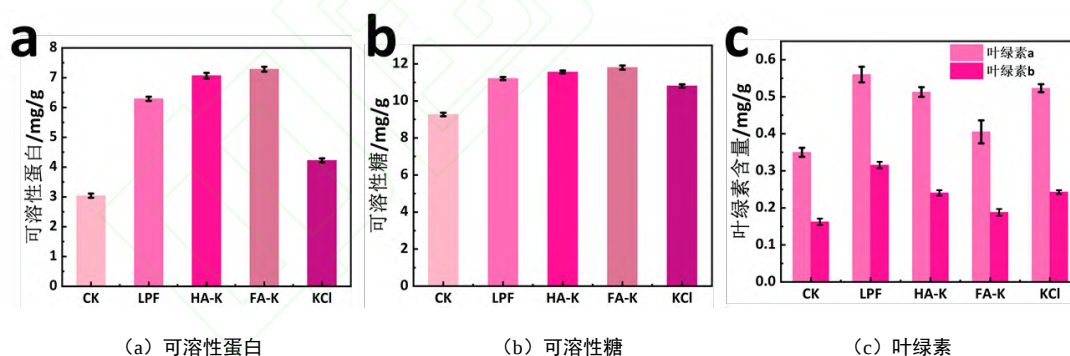


图 6 不同肥料培养条件下植株可溶性蛋白、可溶性糖与叶绿素

Fig. 6 Soluble protein, soluble sugar and chlorophyll of plants under different fertilizer cultivation conditions

由图 6 (b) 可知: 钾肥处理组的植物可溶性糖含量均高于 CK 组, 腐殖酸钾和黄腐酸钾处理下的叶片中可溶性糖含量可达到 (11.60 ± 0.07) mg/g 与 (11.80 ± 0.11) mg/g, 木质素钾处理后达 (11.20 ± 0.08) mg/g, 与腐殖酸钾、黄腐酸钾处理组相当, 并显著高于 KCl 处理组和 CK 组。这说明木质素钾能促进叶片中糖类的合成与运输, 提高糖类的转化效率^[28]。这是因为木质素钾肥培养下的玉米幼苗具有发达的根系, 从而增强对水分和养分的吸收与运输能力, 提升叶片的光合作用效率, 促进糖类的合成与积累^[29]。

由图 6 (c) 可知: 木质素钾处理组的叶绿素 a 含量最高, 为 (0.56 ± 0.09) mg/g, 显著高于 CK 组, 提升 59.9%; 同时, 也优于腐殖酸钾、氯化钾和黄腐酸钾处理组。叶绿素 b 的变化趋势与之类似, 木质素钾处理组同样表现最佳, 较 CK 组提升 94.6%, 且高于其他各钾处理组。钾作为植物生长必需的大量元素, 它参与植物体内多种酶的活化, 促进光合作用中糖类的合成与运输, 为叶绿素合成提供能量和物质基础, 有利于叶绿素的合成与稳定, 从而提升叶绿素含量^[30]。与阳性对照组对比, 施用木质素钾肥在提高叶

片中叶绿素含量展现出更为明显的优势,这可能是木质素钾肥对植物根系的生长有积极的促进作用,它可以刺激根系伸长,增加侧根数量以及提高根系的活力。发达的根系能够更广泛地吸收养分,提高对其他与叶绿素合成相关的营养元素(如氮、镁等)的吸收效率,协同为叶绿素的合成提供全面的营养支持[31-32]。

以上实验结果表明,该木质素钾肥能有效促进玉米幼苗生长,通过协同提升关键生理指标(叶绿素、可溶性蛋白与糖含量)。

2.4 全量化利用物料衡算

全组分利用过程物料衡算结果如图7所示。由图



图7 全组分利用过程物料衡算

Fig. 7 Material Balance in the Utilization Process of All Components

3 结论

采用蒸汽爆破(1.75 MPa, 维持30 min)对玉米秸秆进行预处理,可将爆破后的物料分为长纤维组分与短纤维+水洗液组分,总回收率达89.4%。短纤维+水洗液组分制备的高性能抑尘剂,其抗压强度为650 kPa,且能完全抵抗10级大风风蚀,表现出优异的抗风性能。长纤维组分经酶解后,纤维素酶解率超过92%。酶解残渣则通过氧碱工艺转化为高效的木质素钾肥,该钾肥钾含量达14.1%,并在玉米幼苗实验中表现出优于传统钾肥的促生效果。本工艺实现了玉米秸秆的全量化、高值化利用,不仅为农业废弃物的资源化处理提供了新策略,也为开发新型绿色钾肥开辟了途径。

参考文献:

- [1] 张鑫琦, 朴昭瑛, 姜睿, 等. 玉米秸秆综合利用: 废弃物的多领域价值转化[J]. 食品工业, 2025, 46(11): 159-163.
- [2] 邹亮, 谢心雨, 黄禹铭, 等. 减量施氮和秸秆还田实现麦玉轮作系统氮平衡[J]. 西北农业学报, 2026,

7 可知,经汽爆处理后,绝干176.0 g玉米秸秆经汽爆处理后可得101.5 g抑尘剂(绝干),同时获得55.2 g秸秆长纤维组分。长纤维组分经酶解处理可分别得到26.4 g可发酵糖与30.2 g酶解渣。将酶解渣在150 °C下氧碱反应2 h,其中反应氧压为1 MPa, KOH添加量为6.6 g(占酶解渣质量的22%),反应得到32.5 g木质素钾肥。将工艺放大到处理1吨玉米秸秆,1吨玉米秸秆全量化处理工艺流程需KOH 37.8 kg,可产抑尘剂576.7 kg,产可发酵糖150.0 kg,产木质素钾肥184.7 kg,实现了玉米秸秆组分的全量化利用与高值化利用。

- 35(3): 447-456.
- [3] 陈石明, 李昕珂. 生态文明视域下秸秆综合性治理机制构建[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2025, 19(4): 69-82.
- [4] 郑续, 王慧梅, 刘忠, 等. 小麦秸秆的蒸汽爆破及其产物表征[J]. 天津科技大学学报, 2020, 35(4): 26-30.
- [5] 高丽红, 赵鑫鹏, 周青波, 等. 秸秆高附加值工业应用现状[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(5): 1-6+10.
- [6] 姚长洪, 王岚, 陈洪章. 秸秆汽爆分级长短纤维酶解性能差异性的研究[J]. 过程工程学报, 2023, 23(10): 1488-1496.
- [7] 方妍欣, 王博, 林南屏, 等. 不同氨化处理对还田秸秆养分释放及夏玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2026, 44(1): 208-218.
- [8] 邓婉清, 钟宇, 邓云, 等. 蒸汽爆破在农产品副产物高值化利用中的应用[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(12): 189-196.
- [9] 张慧玲, 王张伟, 周中凯. 汽爆及发酵处理对藜麦秸秆挥发性风味物质的影响[J]. 天津科技大学学报, 2019, 34(1): 24-31.
- [10] 赵鑫鹏, 周青波, 郑艳, 等. 蒸汽爆破膨化改性对玉米秸秆结构及复合板机械性能的影响[J]. 生物质化工

- 程, 2022, 56(6): 17-23.
- [11] Yan Feng, Tian Shuangqi, Du Ke, et al. Effects of steam explosion pretreatment on the extraction of xylooligosaccharide from rice husk[J]. *Bioresources*, 2021, 16(4): 6910-6920.
- [12] 左修源, 孙兆楠, 李雨蒙, 等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定高盐高有机质土壤中速效钾和缓效钾[J]. *中国无机分析化学*: 2026, 16(1): 1-13.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 1 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 133-137.
- [14] 李慧颖, 李靖, 陈文成, 等. 玉米秸秆饲料化汽爆工艺参数的研究[J]. *农业与技术*, 2024, 44(22): 43-50.
- [15] Tang Xinjing, Wang Zhirong, Zheng Jiong, et al. Physicochemical, structure properties and in vitro hypoglycemic activity of soluble dietary fiber from adlay (*Coix lachryma-jobi* L. var. *ma-yuen* Stapf) bran treated by steam explosion[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1124012.
- [16] Pérez-limiñana M, Pérez-aguilar H, Ruzafa-silvestre C, et al. Effect of processing time of steam-explosion for the extraction of cellulose fibers from phoenix canariensis palm leaves as potential renewable feedstock for materials[J]. *Polymers*, 2022, 14(23): 5206.
- [17] Homiyuen A, Vanitjinda G, Yingkamhaeng N, et al. Microcrystalline cellulose isolation and impregnation with sappan wood extracts as antioxidant dietary fiber for bread preparation[J]. *Acs Omega*, 2023, 8(34): 31100-31111.
- [18] Chen Yuanhang, Yan Zhenyun, Liang Long, et al. Comparative evaluation of organic acid pretreatment of eucalyptus for kraft dissolving pulp production[J]. *Materials*, 2020, 13(2): 361.
- [19] Wang Shizeng, Cheng Gang, Joshua C, et al. Furfural tolerance and detoxification mechanism in *Candida tropicalis*[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2016, 9: 250.
- [20] Yu Shengnan, Chen Kai, Qin Chen, et al. Liquid, sprayable, and Environment-friendly PSGT dust suppressant for coal dust control[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 726: 137746.
- [21] Wang Mingyan, Huang Dongfen, Sun Yue, et al. Antibacterial activity of modified sesbania gum composite film and its preservation effect on wampee fruit (*Clausena lansium* (Lour.) Skeels)[J]. *Foods*, 2024, 13(5): 639.
- [22] Wei Xuyao, Jiang Caixia, Liu Xiaolan, et al. Effect of γ -irradiation combined with enzymatic modification on the physicochemical properties of defatted rice bran dietary fiber[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 24: 101975.
- [23] Zhang Liye, Liu Yue, Li Zhiqiang. Effects of reduced severity of ammonium sulfite pretreatment on bamboo for high cellulose recovery[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(52): 30489-30495.
- [24] Zhao Yuze, Wang Guanhua, Luo Yunmeng, et al. Catalytic oxidative depolymerization of lignin into oligomers with multifunctional plant growth regulation in low dose[J]. *Bioresource Technology*, 2026, 442: 133678.
- [25] Zhao Yuze, Dong Ruonan, Wang Guanhua, et al. Lignin-based metal chelate fertilizers: preparation, properties and applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 312: 144108.
- [26] Zhang Wenhui, Wang Guanhua, Zhang Bo, et al. Green potassium fertilizer from enzymatic hydrolysis lignin: Effects of lignin fractionation on wheat seed germination and seedling growth[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 262: 130017.
- [27] 王国栋, 石磊, 吕宁, 等. 滴施有机酸对新疆绿洲棉田钾素活化及其生长调控效应的影响[J]. *绿洲农业科学与工程*, 2025, 10(4): 1-11.
- [28] Wu Kongjie, Hu Chengxiao, Wang Jing, et al. Comparative effects of different potassium sources on soluble sugars and organic acids in tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 308: 111601.
- [29] Buss W, Hasemer H, Ferguso S, et al. Stabilisation of soil organic matter with rock dust partially counteracted by plants[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(1): e17052.
- [30] 平文超, 徐婧, 曹平平, 等. 外源钾对盐胁迫下植物生长和生理特征影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2023, 39(9): 100-105.
- [31] 周丽平, 袁亮, 赵秉强, 等. 腐植酸的组成结构及其对作物根系调控的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(2): 334-343.
- [32] 李敏, 卜容燕, 韩上, 等. 安徽省冬小麦施肥现状与肥料利用效率[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3051-3059.