

γ 射线辐照及粒径对芦苇秸秆酶解发酵的影响

齐慧¹ 陈亮¹ 武小芬¹ 刘安¹ 王丹阳² 张勇¹ 邓明¹ 王克勤¹

¹(湖南省农业科学院 核农学与航天育种研究所/湖南省农业生物辐照工程技术研究中心 长沙 410125)

²(湖南大学研究生院 隆平分院 长沙 410125)

摘要 以经过不同吸收剂量(0~500 kGy)的 γ 射线辐照处理后的芦苇秸秆为研究对象,机械粉碎后过筛,研究吸收剂量、过筛孔径对其粒径分布、粉碎能耗、主要组分含量、纤维素酶解转化率、纤维素乙醇转化率的影响。研究结果显示:随着过筛孔径的减小,所获得的芦苇秸秆样品质量显著减少,且与吸收剂量负相关;芦苇的粉碎能耗随吸收剂量的升高而降低,获得相同质量的过筛样品,粉碎能耗又随过筛孔径的减小而显著增加;相同吸收剂量处理的芦苇秸秆,其纤维素酶解转化率和纤维素乙醇转化率均随过筛孔径的减小而增大,其中吸收剂量为分别 0 kGy、206 kGy、404 kGy,粒径范围在 $r < 0.180$ mm 的芦苇秸秆样品其纤维素酶解转化率较 $r < 0.850$ mm 样品分别提高 129.20%、85.98%、106.63%,纤维素乙醇转化率分别提高 136.04%、21.75%、4.39%。综合比较粉碎能耗与纤维素酶解转化率和纤维素乙醇转化率的增加比率,最终确定未辐照(0 kGy)芦苇秸秆样品的最佳过筛孔径为 0.850 mm;吸收剂量为 206 kGy、404 kGy 的芦苇秸秆样品最佳过筛孔径为 0.425 mm。

关键词 芦苇, γ 射线辐照, 粒径, 酶解, 发酵

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0057

Effects of γ -ray irradiation and particle size on enzymatic hydrolysis and fermentation of reed straws

QI Hui¹ CHEN Liang¹ WU Xiaofen¹ LIU An¹ WANG Danyang²

ZHANG Yong¹ DENG Ming¹ WANG Keqin¹

¹(Hunan Institute of Nuclear Agricultural Science and Space Mutation Breeding, Hunan Academy of Agricultural Sciences/ Hunan province Engineering Technology Research Center of Agricultural Biological Irradiation, Changsha 410125, China)

²(Longping Branch, Graduate School of Hunan University, Changsha 410125, China)

ABSTRACT To explore the effects of absorbed dose and particle size on enzymatic hydrolysis and fermentation of reed straws (*Phragmites australias*), the straws were irradiated with γ -ray irradiation at different doses (0 – 500 kGy) and then passed through different aperture sieves after mechanical grinding. The effects of absorbed doses

基金资助: 湖南省自然科学基金项目 (2020JJ5286)、国家自然科学基金 (12005058)、湖南省农业科学院科技创新项目 (2021CX68、2021CX39)资助

第一作者: 齐慧,女,1988年12月出生,2013年于中国农业科学院农产品质量与食品安全专业获农学硕士学位,现从事辐照技术在农业废弃物中的应用研究,助理研究员,E-mail: qh881206@126.com

通信作者: 王克勤, 研究员, E-mail: wkq6412@163.com

收稿日期: 初稿 2022-05-18; 修回 2022-07-13

Supported by Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ5286), National Natural Science Foundation of China (12005058), Science and Technology Innovation Project of Hunan Academy of Agricultural Sciences (2021CX68 and 2021CX39)

First author: QI Hui (female) was born in December 1988, and obtained her master's degree in Quality of Agricultural Products and Food Safety from Chinese Academy of Agricultural Sciences in 2013. Now she is an assistant professor engaging in the application of irradiation technology in agricultural waste. E-mail: qh881206@126.com

Corresponding author: WANG Keqin, professor, E-mail: wkq6412@163.com

Received 18 May 2022; accepted 13 July 2022

and sieving aperture size on particle size distribution, comminution energy, main component content, enzymatic hydrolysis conversion rate, and ethanol conversion rate of cellulose were examined, and the optimal respective sieving aperture for reed straws with different absorbed doses were determined. The results showed that with decreasing sieve aperture size, reed straw quality decreased significantly and was negatively correlated with the absorbed dose; the comminution energy of reed straws decreased with increasing absorbed doses. With respect to consistent quality of sieved reed straws, the comminution energy increased significantly with decreasing sieving particle size. In reed straws with the same absorbed dose, the enzymatic hydrolysis conversion rate and ethanol conversion rate of cellulose increased with decreasing sieving aperture size. Compared with reed straws with particle size $r < 0.850$ mm, the cellulose enzymatic hydrolysis conversion rates in reed straws with particle size $r < 0.180$ mm increased by 129.20%, 85.98%, and 106.63% at absorbed doses of 0 kGy, 206 kGy, and 404 kGy, respectively, and cellulose ethanol conversion increased by 136.04%, 21.75%, and 4.39%, respectively. By comprehensively comparing the increased ratios of comminution energy, cellulose enzymatic hydrolysis conversion rate, and cellulose ethanol conversion rate, the optimal sieving aperture of non-irradiated (0 kGy) reed straws was determined to be 0.850 mm, and that of reed straws irradiated with 206 kGy or 404 kGy was determined to be 0.425 mm.

KEYWORDS Reed straws, γ -ray irradiation, Grain diameter, Enzymatic hydrolysis, Fermentation

CLC TL99

随着工业化及社会经济的快速发展,能源安全和环境污染问题日益成为世界可持续发展的主要制约因素,随着化石能源的逐渐枯竭,发展绿色可再生资源刻不容缓。生物燃料乙醇因其可再生、环境友好、促进农业发展等优势,成为替代汽油消费的潜在选择。富含木质纤维素的农林废弃物因其量大、经济、且不与人和动物争粮等特点,已成为第二代生物燃料乙醇的主要原料。研究表明:富含木质纤维素的农林废弃物因其量大、经济、且不与人和动物争粮等特点,已成为第二代生物燃料乙醇的主要生产原料。研究表明,芦苇(*Phragmites australias*)的木质纤维素含量,特别是纤维素含量明显高于常见农林废弃物(如稻草、油菜秸秆、玉米秸秆等),而纤维素是生物燃料乙醇的主要糖源^[1-2]。因此,以芦苇为原料发酵产乙醇成为研究热点^[3-4]。

利用生物质生产燃料乙醇的工艺流程为:原料预处理—水解糖化—发酵—纯化—精馏^[5]。纤维素是生物质制备燃料乙醇的主要原材料,其被高度聚合的木质素包裹,难以与生物催化剂接触,严重降低反应效率。因此,在水解糖化之前,预处理破坏木质素结构、膨化纤维素成分是不可或缺的步骤。传统的预处理方式有物理方法(机械挤压、微波、爆破等)、化学方法(稀酸处理、碱处理等)、生物方法(真菌生物预处理等)、离子液体法等。诸多研究表明:相对于常用的预处理方式,如粉碎、蒸汽爆破、酸碱处理及生物方法等^[6-9],高能辐照技术具有操作简单、破坏程度大、酶解转化率提升明显、反应条件温

和、对环境友好等优势,目前已成为生物质高效利用过程中的有效物理预处理手段^[10]。

高能辐照处理对生物质材料的粒径也有一定的影响,在一定的吸收剂量范围内,小粒径的比重会随着吸收剂量而增大。Wu等^[11]研究发现,稻草、油菜秸秆、玉米秸秆经相同粉碎时间的粉碎处理后,其粒径 $r < 0.075$ mm的颗粒均随着吸收剂量的增加而显著增加,其中,未经辐照处理和经1 000 kGy吸收剂量处理后的样品,其粒径 $r < 0.075$ mm的颗粒的比率分别为3.64%~9.83%和36.70%~54.64%。唐洪涛等^[12]研究发现,玉米秸秆经800 kGy辐照处理后,秸秆粒度 $r < 0.075$ mm的颗粒占比由7.6%(未辐照)增加至42.4%。研究表明,生物质经机械粉碎至不同颗粒尺度,显著影响其酶解后葡萄糖产量。Ji等^[13]以稻草为研究对象,研究发现,稻草粉碎至细胞尺度($< 0.050 \sim 0.030$ mm)后,其结晶度显著降低,酶解后葡萄糖产量为287.07 mg/g,较组织尺度(0.500~0.100 mm)颗粒样品提高149.02%。目前,关于粒径对生物质酶解发酵影响的相关研究多将生物质颗粒进行多级过筛,对于单级过筛的样品的酶解发酵研究较少,而多级过筛操作因其成本高、难度大严重制约工业化利用。以生物质为原料的绿色制造研究是目前的研究热点,原料的粒径选取多为细粉碎范畴(0.500~0.100 mm)^[14-15],但关于最适粒径范围,特别是结合辐照处理的最适粒径范围研究甚少。本试验以芦苇为研究对象,通过辐照结合机械粉碎预处理,经过不同孔径的单一筛筛分,对比

粒径分布、粉碎能耗、组分含量及纤维素酶解转化率、纤维素乙醇转化率等,确定最佳过筛粒径,满足工业化需求,以期为生物质大规模利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

芦苇秸秆:2018年11月采集于湖南省洞庭湖区。酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*):中国工业微生物菌种保藏管理中心(China center of industrial culture collection, CICC),编号:33068。甲酸、乙酸、无水葡萄糖、木糖、阿拉伯糖、纤维二糖、无水乙醇、硫酸铵、磷酸二氢钾、无水硫酸镁、硫酸、磷酸氢二铵、无水氯化钙、氢氧化钙、氢氧化钠(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司;酵母粉(生化试剂):广东环凯微生物科技有限公司;纤维素酶(滤纸酶活100 FPU/mL):Novozymes公司。发酵培养基:硫酸铵2 g/L、磷酸二氢钾5 g/L、无水硫酸镁1 g/L、无水氯化钙0.2 g/L、酵母粉5 g/L;pH≈6(碳源为玉米秸秆),115 °C灭菌20 min。活化培养基:葡萄糖50 g/L、硫酸铵2 g/L、磷酸二氢钾5 g/L、无水硫酸镁1 g/L、无水氯化钙0.2 g/L、酵母粉5 g/L;pH≈6,115 °C灭菌20 min。

1.2 仪器与设备

^{60}Co γ 辐照装置(源强 2.96×10^{16} Bq):湖南省核农学与航天育种研究所;Thermo Ultimate 3000高效液相色谱仪(High performance liquid chromatography, HPLC):赛默飞世尔科技(中国)有限公司;TG16-II台式高速离心机:长沙平凡仪器仪表有限公司;YXQ-LS-50S11压力蒸汽灭菌器:上海博迅实业有限公司医疗设备厂;HZQ-F100恒温摇床:常州诺基仪器有限公司;BlueStar A紫外分光光度计:北京莱伯泰科仪器股份有限公司;中草药粉碎机(FW177):天津市泰斯特仪器有限公司;落地式洁净工作台(SW-CJ-2D):邦西仪器科技(上海)有限公司;电子天平(BSA224S):赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;电热恒温干燥箱(BGZ-76):上海博迅实业有限公司。

1.3 方法

1.3.1 芦苇秸秆辐照处理

芦苇秸秆自然晒干,切成10~15 cm的小段,装

入金属样品盒,于室温条件下用 ^{60}Co γ 射线进行辐照预处理,剂量率为1.25 kGy/h,吸收剂量分别为0 kGy、200 kGy、300 kGy、400 kGy、500 kGy(实际吸收剂量分别为0 kGy、206 kGy、312 kGy、404 kGy、498 kGy),处理后备用。

1.3.2 芦苇秸秆粉碎处理

称取§1.3.1所得的试验材料1 kg(5份),采用中草药粉碎机(24 000 r/min, $P=2$ kW/h)粉碎处理30 s,其中4份,每份分别过孔径0.850 mm、0.425 mm、0.250 mm、0.180 mm筛,收集粒径 $r<0.850$ mm、 $r<0.425$ mm、 $r<0.250$ mm、 $r<0.180$ mm的样品;第五份不过筛,收取所有颗粒(All)并分别称重,自封袋保存,备用。

粉碎能耗(kWh)=(芦苇杆原料质量/ m) \times 粉碎时间 \times 仪器功率。其中: m 为获得相应粒径范围的芦苇杆的质量。

1.3.3 水提处理

(1)水提。称取§1.3.2所述粒径的吸收剂量分别为0 kGy、206 kGy、404 kGy的芦苇秸秆3 g(精确至0.000 1 g),置于具塞三角瓶中,按1:30的比例加入去离子水,于50 °C 200 r/min条件下浸提处理2 h后过滤,滤渣烘干至恒重,滤液测定葡萄糖和木糖含量,滤液备用;

(2)水提液酸水解。量取§1.3.3(1)滤液14 mL,加入0.5 mL 72%硫酸,置于高压灭菌锅中,121 °C条件下反应1 h后取出,6 000 r/min离心5 min,取上清测定葡萄糖和木糖含量,计算样品中可溶性葡聚糖、木聚糖的含量,见公式(1)、(2)。

可溶性葡聚糖含量=(水提液酸水解后的葡萄糖含量-水提液葡萄糖含量) $\times 0.9$ /样品干重 $\times 100\%$

(1)

可溶性木聚糖含量=(水提液酸水解后的木糖含量-水提液木糖含量) $\times 0.9$ /样品干重 $\times 100\%$

(2)

1.3.4 组分含量测定

称取烘干的试验样品0.3 g(精确至0.000 1 g),加入3 mL 72%硫酸,30 °C条件下水浴反应1 h,每5~10 min振摇1次,加入蒸馏水84 mL,置于高压灭菌锅中,121 °C条件下反应1 h后取出,滤纸过滤,滤液、滤渣备用。

(1)葡聚糖和木聚糖含量的测定。滤液采用HPLC测定葡萄糖和木糖含量,计算样品中葡聚糖、木聚糖的含量,计算见公式(3)、(4)。

纤维素含量=滤渣水解后葡萄糖含量 $\times 0.9$ /样品干重 $\times 100\%$

(3)

半纤维素含量= 滤渣水解后木糖含量 \times 0.9/样品干重 \times 100% (4)

(2) 木质素含量的测定: 滤液采用分光光度计在 320 nm 波长下测定吸光度, 按以下公式计算酸溶性木质素含量; 滤渣 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重, 称重, 即为酸不溶性木质素质量; 酸溶性木质素与酸不溶性木质素含量总和即为木质素含量, 见公式(5)、(6)。

酸溶性木质素含量 = 吸光度 \times 体积 \times 稀释倍数/ (样品干重 $\times\epsilon$) (5)

式中: $\epsilon=30\text{ L}/(\text{g}\cdot\text{cm})$

酸不溶性木质素含量 = 酸不溶性木质素质量/样品干重 \times 100% (6)

1.3.5 酶解

称取不同粒径吸收剂量分别为 0 kGy、206 kGy、404 kGy 辐照的芦苇秸秆 2.0 g (精确至 0.000 1 g), 按固液比 1:15 加入 0.1 mol/L 的乙酸-乙酸钠缓冲溶液 (pH=4.8), 纤维素酶加入量 20 FPU/g, 摇匀后置于 50 $^{\circ}\text{C}$ 130 r/min 条件下进行酶解反应。反应 48 h 后取样 0.5 mL, 6 000 r/min 离心 5 min 后取上清 200 μL , 加流动相溶液稀释 5 倍, 过膜, 备用。通过测定葡萄糖含量, 计算出葡聚糖转化率, 见公式(7)。

纤维素酶解转化率=(测得葡萄糖质量 \times 0.9)/ (样品干重 \times 样品中纤维素含量) \times 100% (7)

1.3.6 分步糖化发酵

采用发酵培养基替代§1.3.5 乙酸-乙酸钠缓冲溶液, 按照§1.3.5 试验步骤进行酶解处理 72 h 后, 6 000 r/min 离心 5 min 后取上清 10~50 mL, 发酵专用具塞锥形瓶, 115 $^{\circ}\text{C}$ 高压灭菌 20 min, 取出放置室温, 接入 1 mL 种子培养液, 置于恒温摇床中, 37 $^{\circ}\text{C}$ 、150 r/min 条件下进行发酵, 发酵 24 h 后, 取样 0.5 mL, 6 000 r/min 离心 5 min 后取上清 200 μL , 加流动相溶液稀释 5 倍, 过膜, 备用。通过测定乙醇含量, 计算出乙醇转化率, 见公式(8)。

纤维素乙醇转化率=(发酵液中乙醇质量-接种液中乙醇质量)/(理论乙醇转化质量) \times 100% (8)
式中: 理论乙醇转化质量=样品纤维素质量 \times 1.1 \times 0.51。

1.4 测定方法

1.4.1 还原糖含量测定

利用 HPLC 测定还原糖含量。色谱柱: Bio-RAD AminexR HPX-87H Ion Exclusion Column (300 mm \times 7.8 mm); 流动相: 0.005 mol/L H_2SO_4 ; 流速: 0.6 mL/min; 柱温: 55 $^{\circ}\text{C}$; 柱后冷却温度: 30 $^{\circ}\text{C}$; 检测

器: 示差折光检测器 (Refractive index detector, RID); 检测器温度: 45 $^{\circ}\text{C}$; 进样体积: 10 μL 。

1.4.2 乙醇含量测定

利用 HPLC 测定乙醇含量, 具体操作同 HPLC 测定还原糖含量。

1.5 数据处理

采用 SAS 8.1 和 Microsoft Excel 2010 分析整理数据; Origin 8.0 制图。

2 结果与讨论

2.1 辐照处理对芦苇秸秆粒径分布及粉碎能耗的影响

图 1 为辐照处理对芦苇秸秆粉碎后粒径分布的影响。

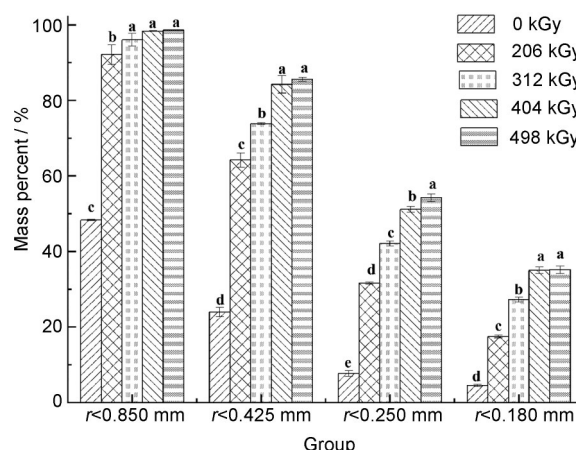


图 1 不同吸收剂量下芦苇秸秆粉碎粒径分布图; a、b、c、d, 同一指标不同字母表示存在显著差异 ($p<0.05$)

Fig.1 Particle size distribution of crushed reed straws at different absorbed irradiation doses; a, b, c, d, there are significant differences in the same series with different letters ($p<0.05$)

由图 1 可知, 经辐照处理后, $r<0.850\text{ mm}$ 、 $r<0.425\text{ mm}$ 、 $r<0.250\text{ mm}$ 、 $r<0.180\text{ mm}$ 芦苇秸秆样品的质量百分比均随吸收剂量的增加而逐渐增大; 吸收剂量与不同粒径范围芦苇秸秆样品的质量百分比存在一定的相关性, 粒径 $r<0.850\text{ mm}$ 、 $r<0.425\text{ mm}$ 、 $r<0.250\text{ mm}$ 和 $r<0.180\text{ mm}$ 的芦苇秸秆样品分别在吸收剂量范围 0~312 kGy、0~404 kGy、0~498 kGy、0~404 kGy 存在显著性差异; 吸收剂量为 498 kGy 的芦苇秸秆较对照 (0 kGy) 处理, 其粒径 $r<0.850\text{ mm}$ 、 $r<0.425\text{ mm}$ 、 $r<0.250\text{ mm}$ 、 $r<0.180\text{ mm}$ 的芦苇秸秆的质量百分比分别增加 1.04 倍、2.58 倍、6.05 倍和 6.80 倍。原因可能是随着吸收剂量的增加,

芦苇秸秆样品脆性增加,且内部结构破坏逐渐严重,经相同条件粉碎处理后,小颗粒的百分含量逐渐增加^[16-17]。

图2为获得1 000 kg相应粒径范围的芦苇秸秆样品的粉碎能耗。由图2可知,在吸收剂量范围为0~498 kGy,获得1 000 kg 粒径为 $r<0.850$ mm、 $r<0.425$ mm、 $r<0.250$ mm、 $r<0.180$ mm 的芦苇秸秆样品的粉碎能耗均随吸收剂量的增加而减小。不同粒径范围的样品与吸收剂量之间的相关性有差异,在0~498 kGy 吸收剂量范围内,获得相同质量粒径 $r<0.850$ mm 和 $r<0.425$ mm 的芦苇秸秆样品,当吸收剂量大于206 kGy,芦苇秸秆粉碎能耗均不再显著降低;获得相同质量粒径为 $r<0.250$ mm 的芦苇秸秆样

品,吸收剂量大于404 kGy 芦苇秸秆粉碎能耗不再显著降低;获得相同质量粒径 $r<0.180$ mm 的芦苇秸秆样品,吸收剂量大于312 kGy 芦苇秸秆样品的粉碎能耗不再显著降低。获得相同质量(1 000 kg)的4种不同粒径的芦苇秸秆样品,随着粒径的减小,粉碎能耗显著增加;在吸收剂量分别为0 kGy、206 kGy、312 kGy、404 kGy、498 kGy 的情况下,获得1 000 kg 粒径 $r<0.180$ mm 的芦苇秸秆样品,其粉碎能耗分别是获得相同质量粒径 $r<0.850$ mm 的芦苇秸秆样品的9.725倍、4.275倍、2.528倍、1.810倍和1.805倍。以上实验结果进一步证明,辐照处理能破坏芦苇的内部结构,与前人研究结果趋势相一致^[18-19]。

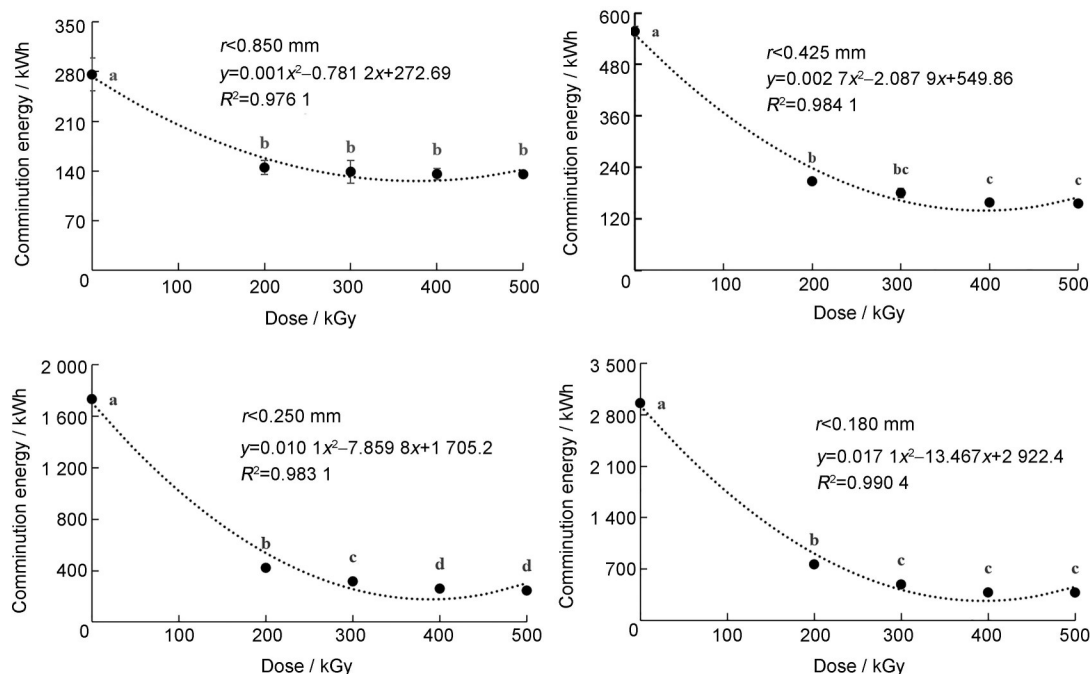


图2 不同剂量辐照处理后芦苇秸秆粉碎至不同粒径范围的粉碎能耗; a、b、c、d,同一指标不同字母表示存在显著差异($p<0.05$)

Fig.2 Comminution energy of reed straws to different particle size ranges under different absorbed doses; a, b, c, d, there are significant differences in the same series with different letters ($p<0.05$)

2.2 辐照及粉碎处理对芦苇组分含量的影响

表1为不同吸收剂量的芦苇秸秆样品粉碎过不同孔径筛后,其水提液成分和木质纤维素组分含量测定结果。由表1可知,吸收剂量为0 kGy、206 kGy、404 kGy 的芦苇秸秆样品,其水提液中的葡萄糖和木糖含量均较低,最高的葡萄糖和木糖含量分别是1.258 mg/g 和1.060 mg/g;水提液中的葡聚糖和木聚糖含量随着吸收剂量的增加而显著增加,其原因可能是:辐照处理对纤维素、半纤维素的降解效应,将其转化为可溶性葡聚糖和木聚糖^[18]。同一吸收剂量

的芦苇秸秆样品,其可溶性葡聚糖和木聚糖含量均与样品的过筛孔径大小存在显著相关性,随着过筛孔径的减小而显著增加,即样品颗粒越细,其溶出物越多,以未辐照样品为例,经粉碎机30 s 粉碎处理后,分别过不同孔径筛后获得的粒径为 $r<0.850$ mm、 $r<0.425$ mm、 $r<0.250$ mm、 $r<0.180$ mm 的芦苇秸秆样品,其水提液中可溶性葡聚糖含量较未过筛芦苇秸秆样品分别提高35.09%、82.58%、190.67%和284.79%;其水提液中可溶性木聚糖含量较未过筛芦苇秸秆样品分别提高43.52%、71.02%、113.96%和138.48%。其原因可能是颗粒越细,其比

表面积越大,与水分子的接触面积也越充分;但随着吸收剂量的增加,芦苇结构的破坏程度增加,再经粉碎处理后样品粒径变小,与水分子接触面积增加,因此其可溶性葡聚糖和木聚糖含量均增加。但是随着吸收剂量的增加,过相同孔径筛后获得的不同颗粒芦苇秸秆样品之间,其水提液中的葡萄糖、木糖、葡聚糖及木聚糖含量之间的差异逐渐减小,以吸收剂量为 0 kGy、206 kGy、404 kGy,粒径为 $r < 0.180$ mm 的芦苇秸秆样品为例,其葡萄糖含量较未

过筛样品分别提高 2 122.45%、159.38% 和 30.05%;其木糖含量较未过筛样品分别提高 361.75%、34.38% 和 24.12%;其葡聚糖含量较未过筛样品分别提高 284.79%、43.96% 和 26.08%;其木聚糖含量较未过筛样品分别提高 138.48%、26.02% 和 18.39%。原因是随着吸收剂量的增加,对芦苇结构的破坏逐渐增大,在相同的粉碎处理下更易被粉碎为小粒径,即小粒径的颗粒占比增加,过不同孔径筛获得样品间的差异逐渐减小。

表1 辐照处理芦苇秸秆在不同粒径下的水提液成分及组分测定
Table 1 Determination of components and components of water extract of irradiated reed straws under different particle sizes

剂量 / kGy	粒径 r / mm	水提液中糖含量 / (mg·g ⁻¹)		可溶性聚糖含量 / (mg·g ⁻¹)		纤维素含量	半纤维素含量	木质素含
		葡萄糖	木糖	葡聚糖	木聚糖	/ %	/ %	/ %
Dose	Particle size	Glucose	Xylose	Glucan	Xylan	Cellulose content	Hemicellulose content	Lignin content
0	All	0.049±0.005 ^e	0.183±0.002 ^h	0.815±0.044 ^j	1.211±0.010 ^m	39.546±0.372 ^a	18.827±0.000 ^b	22.708±0.808 ^b
	$r < 0.850$	0.101±0.011 ^e	0.380±0.005 ^g	1.101±0.022 ⁱ	1.738±0.049 ^j	39.119±0.084 ^b	18.829±0.023 ^b	23.008±0.651 ^b
	$r < 0.425$	0.205±0.023 ^f	0.525±0.030 ^f	1.488±0.110 ^h	2.071±0.032 ^k	37.980±0.123 ^{ode}	18.858±0.075 ^b	23.500±0.332 ^{ab}
	$r < 0.250$	0.637±0.070 ^d	0.733±0.099 ^d	2.369±0.147 ^e	2.591±0.029 ^j	37.620±0.292 ^e	19.130±0.136 ^a	23.588±0.453 ^{ab}
	$r < 0.180$	1.089±0.120 ^b	0.845±0.088 ^{bc}	3.136±0.250 ^f	2.888±0.007 ⁱ	36.669±0.255 ^g	19.181±0.140 ^a	23.648±0.611 ^{ab}
206	All	0.485±0.003 ^c	0.576±0.001 ^f	3.164±0.031 ^f	5.016±0.042 ^h	38.116±0.083 ^{cd}	18.114±0.033 ^d	23.560±0.285 ^{ab}
	$r < 0.850$	0.504±0.012 ^e	0.568±0.023 ^f	3.200±0.019 ^f	5.067±0.024 ^h	38.241±0.074 ^c	18.061±0.032 ^d	23.570±0.201 ^{ab}
	$r < 0.425$	0.617±0.007 ^d	0.610±0.023 ^{ef}	3.420±0.011 ^e	5.307±0.008 ^g	37.837±0.009 ^{de}	18.056±0.001 ^d	23.813±0.135 ^{ab}
	$r < 0.250$	0.936±0.036 ^c	0.705±0.046 ^{de}	3.971±0.008 ^d	5.843±0.001 ^f	37.008±0.175 ^{fg}	18.152±0.063 ^d	23.855±0.432 ^{ab}
	$r < 0.180$	1.258±0.047 ^a	0.774±0.047 ^{cd}	4.555±0.015 ^b	6.321±0.034 ^c	36.248±0.259 ^h	18.325±0.071 ^c	24.381±0.261 ^a
404	All	0.213±0.018 ^f	0.854±0.051 ^{bc}	4.087±0.027 ^{cd}	11.688±0.163 ^d	37.208±0.029 ^f	17.616±0.031 ^{fg}	23.293±0.099 ^{ab}
	$r < 0.850$	0.212±0.018 ^f	0.853±0.054 ^{bc}	4.090±0.027 ^{cd}	11.715±0.163 ^d	37.199±0.028 ^f	17.608±0.031 ^{fg}	23.287±0.105 ^{ab}
	$r < 0.425$	0.217±0.019 ^f	0.878±0.060 ^b	4.181±0.032 ^c	11.998±0.157 ^c	37.062±0.037 ^f	17.572±0.040 ^g	23.427±0.330 ^{ab}
	$r < 0.250$	0.262±0.016 ^f	0.989±0.022 ^a	4.644±0.038 ^b	12.992±0.075 ^b	36.013±0.133 ^h	17.752±0.055 ^{ef}	23.286±0.939 ^{ab}
	$r < 0.180$	0.277±0.023 ^f	1.060±0.022 ^a	5.153±0.018 ^a	13.837±0.031 ^a	35.147±0.182 ⁱ	17.865±0.147 ^e	23.097±1.102 ^b

注: a、b、c、d,同一指标不同字母表示存在显著差异($p < 0.05$)。

Note: a, b, c, d, there are significant differences in the same series with different letters ($p < 0.05$).

对于芦苇秸秆的木质纤维素含量,随着吸收剂量的增加,纤维素和半纤维素的含量在同一粒径范围均有显著下降,木质素含量的变化不明显。吸收剂量为 206 kGy 和 404 kGy 的芦苇秸秆,其未过筛、粒径为 $r < 0.850$ mm、 $r < 0.425$ mm、 $r < 0.250$ mm、 $r < 0.180$ mm 的样品的纤维素含量较未辐照处理芦苇秸秆相应粒径样品分别降低 3.62%、2.24%、0.38%、1.63%、1.15% 和 5.91%、4.91%、2.42%、4.27%、4.15%;半纤维素含量分别降低 3.79%、4.08%、4.25%、5.11%、4.46% 和 3.79%、6.48%、6.82%、7.20%、6.86%。原因是随着吸收剂量的增加,辐照处

理对芦苇秸秆样品的木质纤维素结构破坏逐渐增强,其中的部分纤维素、半纤维素被降解成小分子聚糖,或进一步降解生成小分子单糖或多糖等^[20]。对于吸收剂量相同的芦苇秸秆样品,随着粒径的减小,其纤维素含量也有显著变化,未辐照、吸收剂量为 206 kGy、404 kGy 的芦苇秸秆样品,其粒径 $r < 0.180$ mm 的芦苇秸秆样品的纤维素含量较粒径 $r < 0.850$ mm 的样品分别减小 6.26%、5.21%、5.52%,原因是,随着样品粒径的减小,在水洗过程中与水的接触面积增加,溶出的可溶物增加,因此水洗滤渣中木质纤维素含量降低。

2.3 辐照及样品粒径对芦苇秸秆葡聚糖酶解转化率的影响

由图3可知,在吸收剂量0~404 kGy范围内,过筛与否对芦苇秸秆样品的纤维素酶解转化率有显著影响,但在不同吸收剂量下的变化规律存在差异。对于未辐照芦苇秸秆样品,经相同时间粉碎处理后过不同孔径筛获得的不同粒径范围的芦苇秸秆样品,随着过筛粒径的减小,其获得的芦苇秸秆样品的纤维素酶解转化率逐渐上升,但 $r<0.42\text{ mm}$ 、 $r<0.250\text{ mm}$ 、 $r<0.180\text{ mm}$ 的芦苇秸秆样品之间无显著性差异;吸收剂量为206 kGy的芦苇秸秆样品, $r<0.850\text{ mm}$ 、 $r<0.425\text{ mm}$ 的芦苇秸秆样品,其纤维素酶解转化率之间无显著性差异,随着过筛孔径的进一步减小,其纤维素酶解转化率显著增加;400 kGy辐照处理的芦苇秸秆样品,随着过筛孔径的减小,其纤维素酶解转化率显著增加, $r<0.180\text{ mm}$ 的芦苇秸秆样品其纤维素酶解转化率达19.92%,较吸收剂量为404 kGy的不过筛芦苇秸秆样品提高106.63%,较 $r<0.180\text{ mm}$ 未辐照样品提高92.77%,较未辐照不过筛样品提高388.67%。

不同吸收剂量及粒径的芦苇秸秆的纤维素酶解转化率方差分析如表2所示。通过查询 F -分布表, $F_{0.05}(2, 30)=3.32$, $F_{0.05}(4, 30)=2.69$, $F_{0.05}(8, 30)=2.27$, $F_{0.01}(2, 30)=5.39$, $F_{0.01}(4, 30)=4.02$, $F_{0.01}(8, 30)=3.17$ 。

表2 不同吸收剂量及粒径的芦苇秸秆的纤维素酶解转化率方差分析
Table 2 Variance analysis of cellulose enzymatic hydrolysis conversion of reed straws with different absorbed doses and particle size

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
Sources of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean sum of square	F value	Significance level
因素A(吸收剂量)	343.58	2	171.79	1 321.46	**
Factor A (irradiation dose)					
因素B(粒径大小)	289.45	4	72.36	556.62	**
Factor B (particle size)					
A×B	34.61	8	4.33	33.31	**
误差E Error E	3.90	30	0.13	-	-
总和 Sum	671.54	44	-	-	-

注:*,表示该因素对纤维素酶解转化率有极显著影响;**表示该因素对纤维素酶解转化率有显著影响。

Note: *, indicates that this factor has a significant effect on the cellulose enzymatic hydrolysis conversion rate; **, indicates that this factor has a high significant effect on the cellulose enzymatic hydrolysis conversion rate.

2.4 辐照及样品粒径对芦苇秸秆纤维素乙醇转化率的影响

由图4可知,对于未辐照处理的芦苇秸秆样品,经相同时间粉碎处理后过不同孔径筛获得的不同

$F_A=1\ 321.46>5.39$,说明吸收剂量对芦苇秸秆纤维素酶解转化率有极显著影响; $F_B=556.62>4.02$,说明粒径大小对芦苇秸秆纤维素酶解转化率有极显著影响; $F_{A\times B}=33.31>3.17$,说明吸收剂量和粒径大小之间的交互作用,对芦苇秸秆纤维素酶解转化率有极显著影响。

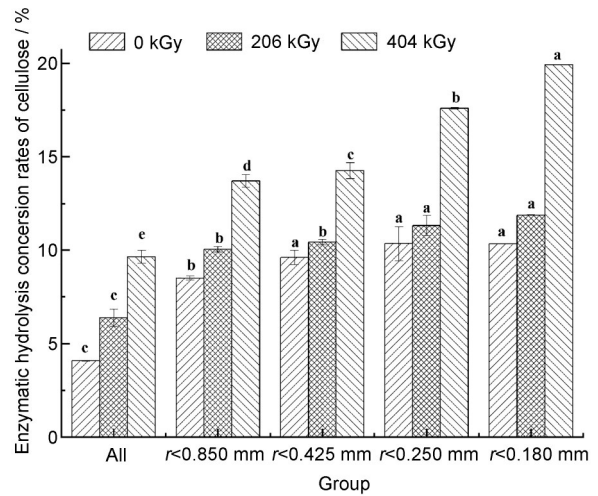


图3 不同吸收剂量下芦苇秸秆的不同粒径样品的纤维素酶解转化率; a、b、c、d,同一指标不同字母表示存在显著差异($p<0.05$)

Fig.3 Cellulose enzymatic hydrolysis conversion rate of reed straws with different particle sizes under different absorbed doses; a, b, c, d, there are significant differences in the same series with different letters ($p<0.05$)

粒径范围的芦苇秸秆样品,随着过筛粒径的减小,其获得的芦苇秸秆样品的纤维素乙醇转化率逐渐上升,粒径 $r<0.180\text{ mm}$ 的芦苇秸秆样品其纤维素乙醇转化率达7.56%,较不过筛样品提高136.04%;吸收剂量为206 kGy的芦苇秸秆样品,粉碎后不过筛、

$r < 0.850$ mm、 $r < 0.425$ mm 的芦苇秸秆样品的纤维素乙醇转化率之间无显著性差异, $r < 0.250$ mm 与 $r < 0.180$ mm 的芦苇秸秆样品的乙醇转化率之间无显著性差异, 最大乙醇转化率为 10.05%; 吸收剂量为 404 kGy 的芦苇秸秆样品, 其纤维素乙醇转化率随着样品过筛粒径的减少而增加的趋势, 且与过筛孔径存在显著相关性, $r < 0.180$ mm 的芦苇秸秆纤维素乙醇转化率最大, 为 9.19%。从理论上说, 芦苇秸秆样品的纤维素酶解转化率越高, 其纤维素乙醇转化率也越高, 原因是纤维素酶解转化率越高会产生更多可以被酵母利用的葡萄糖, 乙醇产率也会随之升高。然而试验结果显示, 纤维素乙醇转化率与其酶解转化率的变化规律不一致, 特别是吸收剂量为 404 kGy 的芦苇秸秆样品的纤维素乙醇转化率显著低于吸收剂量为 206 kGy 辐照处理的芦苇秸秆样品, 原因可能是经 404 kGy 辐照处理的芦苇秸秆样品产生了某些酵母发酵抑制物^[21], 或者在纤维素酶解过程中产生了更多的发酵抑制物^[22], 具体抑制物种类、抑制机理待进一步研究。

不同吸收剂量及粒径的芦苇秸秆的纤维素乙醇转化率方差分析如表 3 所示。通过查询 F -分布表, $F_{0.05}(2, 15) = 3.68$, $F_{0.05}(4, 15) = 3.06$, $F_{0.05}(8, 15) = 2.64$, $F_{0.01}(2, 15) = 6.36$, $F_{0.01}(4, 15) = 4.89$, $F_{0.01}(8, 15) = 4.00$ 。 $F_A =$

$958.98 > 6.36$, 说明吸收剂量对芦苇秸秆纤维素乙醇转化率有极显著影响; $F_B = 487.63 > 4.89$, 说明粒径大小对芦苇秸秆纤维素乙醇转化率有极显著影响; $F_{A \times B} = 52.73 > 4.00$, 说明吸收剂量和粒径大小之间的交互作用, 对芦苇秸秆纤维素乙醇转化率有极显著影响。

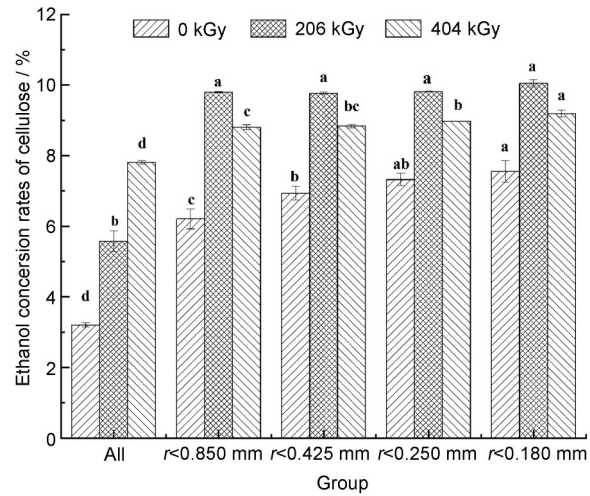


图 4 不同吸收剂量下芦苇秸秆的不同粒径样品的纤维素乙醇转化率; a, b, c, d, 同一指标不同字母表示存在显著差异 ($p < 0.05$)

Fig.4 The cellulose ethanol conversion rates of reed straws with different particle sizes treated with different absorbed doses; a, b, c, d, there are significant differences in the same series with different letters ($p < 0.05$)

表 3 不同吸收剂量及粒径的芦苇秸秆纤维素乙醇转化率方差分析

Table 3 Variance analysis of cellulose ethanol conversion of reed straws with different absorbed doses and particle size

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性
Sources of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean sum of square	F value	Significance level
因素 A (吸收剂量)	46.03	2	23.02	958.98	**
Factor A (absorbed dose)					
因素 B (粒径尺寸)	46.81	4	11.70	487.63	**
Factor B (particle size)					
A×B	10.12	8	1.27	52.73	**
误差 E Error E	0.36	15	0.02	-	-
总和 Sum	103.33	29	-	-	-

注: *, 表示该因素对纤维素乙醇转化率有极显著影响; **, 表示该因素对纤维素乙醇转化率有显著影响。

Note: *, indicates that this factor has a significant effect on the cellulose ethanol conversion rate; **, indicates that this factor has a high significant effect on the cellulose ethanol conversion rate.

2.5 过筛孔径对芦苇秸秆样品粉碎能耗、葡聚糖转化率、乙醇转化率的影响

表 4 为芦苇秸秆样品过不同粒径筛后的粉碎能耗、纤维素酶解转化率及纤维素乙醇转化率较未过筛样品的变化比率。由表 4 可见, 不同吸收剂量的芦苇秸秆样品之间, 其粉碎能耗、纤维素酶解转化率

及纤维素乙醇转化率的增加比率均随着过筛粒径的减小而增加, 其中增加比率最大的粉碎能耗, 特别是未辐照的芦苇秸秆样品。对于未辐照处理的芦苇秸秆样品, 对比不同粒径范围芦苇秸秆样品的粉碎能耗、纤维素酶解转化率及纤维素乙醇转化率分别较未过筛样品的增加比率, 不难发现, $r <$

0.850 mm 的芦苇秸秆样品三者的增加比率接近,而其他粒径范围的芦苇秸秆样品其粉碎能耗大幅度增加,但纤维素酶解转化率及纤维素乙醇转化率却没有成比例增加,因此,对于未辐照的芦苇秸秆样品,最佳过筛孔径为 0.850 mm。对于吸收剂量为 206 kGy 和 404 kGy 的芦苇秆样品,粉碎过筛获得的

粒径范围 $r < 0.850\text{mm}$ 和 $r < 0.425\text{ mm}$ 的芦苇秸秆样品,其粉碎能耗的增加比率小于纤维素酶解转化率及纤维素乙醇转化率的增加比率,因此,吸收剂量为 206 kGy 和 404 kGy 的芦苇秸秆样品,最佳过筛孔径为 0.425 mm。

表 4 过不同粒径筛的芦苇秸秆样品粉碎能耗、纤维素酶解转化率、纤维素乙醇转化率的增加比率
Table 4 Increased ratios of comminution energy, cellulose enzymatic hydrolysis conversion rates and cellulose ethanol conversion rates of reed straws passing through sieves with different particle sizes

粒径 / mm Particle size	粉碎能耗增加百分比 / % Increased ratios of comminution energy			纤维素酶解转化率增加百分比 / % Increased ratios of cellulose enzymatic hydrolysis conversion rates			纤维素乙醇转化率增加百分比 / % Increased ratios of cellulose ethanol conversion rates		
	0 kGy	206 kGy	404 kGy	0 kGy	206 kGy	404 kGy	0 kGy	206 kGy	404 kGy
	$r < 0.850$	106.98	8.55	1.73	108.55	57.45	42.18	93.88	75.70
$r < 0.425$	318.08	35.48	18.75	135.96	63.47	47.89	116.58	75.15	13.12
$r < 0.250$	1 200.60	216.88	95.65	153.90	61.62	82.46	128.73	75.95	14.89
$r < 0.180$	2 120.56	472.69	185.82	129.20	85.98	106.63	136.04	80.20	17.68

3 结论

辐照能破坏芦苇木质纤维素结构,纤维素、半纤维素发生降解生成水溶性组分;粉碎过筛处理能在一定程度上提高芦苇秸秆后续的酶解糖化和发酵产乙醇效率,且吸收剂量、粒径大小以及两者之间的交互作用均对芦苇秸秆纤维素酶解转化率和乙醇转化率有显著影响。试验研究结果显示:未辐照芦苇秸秆样品的最佳过筛孔径为 0.850 mm,获得 $r < 0.850\text{ mm}$ 的芦苇秸秆样品的纤维素酶解转化率为 8.503%,纤维素乙醇转化率为 6.207%;吸收剂量为 206 kGy 和 404 kGy 的芦苇秸秆样品,其最佳过筛孔径为 0.425 mm,所获得 $r < 0.850\text{ mm}$ 的芦苇秸秆样品的纤维素酶解转化率分别为 10.437% 和 14.260%,纤维素乙醇转化率分别为 9.768% 和 8.833%;而芦苇秸秆样品纤维素乙醇转化率随着吸收剂量进一步增加而减少的原因需要进一步研究。

作者贡献声明 齐慧是本研究实验的设计者和试验研究的执行人,主导完成数据分析,论文初稿的写作及参考文献分析;陈亮参与试验设计指导与数据分析;武小芬参与试验结果分析与论文写作与修改;刘安参与试验结果分析;王丹阳参与实验操作、数据记录等;张勇负责实验样品的辐照及剂量跟踪;邓明参与部分实验操作;王克勤指导试验设计、数据分析、论文写作与修改。所以作者均已阅读并

认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- Zhu S D, Wu Y X, Yu Z N, *et al.* Pretreatment by microwave/alkali of rice straw and its enzymic hydrolysis [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(9): 3082-3086. DOI: 10.1016/j.procbio.2005.03.016.
- Jin A X, Ren J L, Peng F, *et al.* Comparative characterization of degraded and non-degradative hemicelluloses from barley straw and maize stems: composition, structure, and thermal properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, **78**(3): 609-619. DOI: 10.1016/j.carbpol.2009.05.024.
- 詹怀宇, 付时雨, 李海龙. 我国非木材纤维制浆的发展概况与技术进步(之二) 蔗渣、芦苇和棉秆[J]. *中华纸业*, 2011, **32**(10): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9211.2011.10.001.
ZHAN Huaiyu, FU Shiyu, LI Hailong. The development overview and technical progress for non-wood fiber pulping of bagasse, reed and cotton stalk[J]. *China Pulp & Paper Industry*, 2011, **32**(10): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9211.2011.10.001.
- Zhang C Y, Su X J, Xiong X Y, *et al.* 60 Co- γ radiation-induced changes in the physical and chemical properties of rapeseed straw[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2016, **85**: 207-214. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.11.022.

- 5 张爱萍, 谢君. 生物质制乙醇预处理方法的研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2014, **35**(4): 77-84. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.2014.04.015.
ZHANG Aiping, XIE Jun. Pretreatment method for production of bioethanol with lignocellulosic material[J]. Journal of South China Agricultural University, 2014, **35**(4): 77-84. DOI: 10.7671/j.issn.1001-411X.2014.04.015.
- 6 赵晓燕, 朱海涛, 张桂香, 等. 超微粉碎预处理对玉米秸秆酶解液中还原糖组分的影响[J]. 粮油食品科技, 2015, **23**(6): 96-98. DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2015.06.025.
ZHAO Xiaoyan, ZHU Haitao, ZHANG Guixiang, *et al.* Effect of superfine comminution on reducing sugar components in corn stalk enzymatic hydrolysate[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015, **23**(6): 96-98. DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2015.06.025.
- 7 Jiang S T, Guo N. The steam explosion pretreatment and enzymatic hydrolysis of wheat bran[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 2016, **38**(2): 295-299. DOI: 10.1080/15567036.2012.744118.
- 8 Sindhu R, Kuttiraja M, Binod P, *et al.* Physicochemical characterization of alkali pretreated sugarcane tops and optimization of enzymatic saccharification using response surface methodology[J]. Renewable Energy, 2014, **62**: 362-368. DOI: 10.1016/j.renene.2013.07.041.
- 9 甄静, 李冠杰, 李伟, 等. 毛栓孔菌 XYG422 菌株产漆酶发酵条件优化及对玉米秸秆生物降解的研究[J]. 菌物学报, 2017, **36**(6): 718-729. DOI: 10.13346/j.mycosystema.160163.
ZHEN Jing, LI Guanjie, LI Wei, *et al.* Fermentation condition optimization of laccase producing strain *Trametes hirsuta* XYG422 and its activity on corn straw degradation[J]. Mycosystema, 2017, **36**(6): 718-729. DOI: 10.13346/j.mycosystema.160163.
- 10 张春艳, 谭兴和, 熊兴耀, 等. 油菜秸秆⁶⁰Co- γ 辐照降解产物分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, **43**(1): 92-97. DOI: 10.13331/j.cnki.jhau.2017.01.016.
ZHANG Chunyan, TAN Xinghe, XIONG Xingyao, *et al.* Analysis of degradation products of rapeseed straw irradiated with ⁶⁰Co- γ [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2017, **43**(1): 92-97. DOI: 10.13331/j.cnki.jhau.2017.01.016.
- 11 Wu X F, Chen L, He W Q, *et al.* Characterize the physicochemical structure and enzymatic efficiency of agricultural residues exposed to γ -irradiation pretreatment[J]. Industrial Crops and Products, 2020, **150**: 112228. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112228.
- 12 唐洪涛, 哈益明, 王锋. γ 射线辐照玉米秸秆预处理对酶解产糖的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2011, **29**(5): 307-313.
TANG Hongtao, HA Yiming, WANG Feng. Effect of γ -rays radiation pretreatment on enzymatic hydrolysis of corn straw for producing sugar[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2011, **29**(5): 307-313.
- 13 Ji G Y, Han L J, Gao C F, *et al.* Quantitative approaches for illustrating correlations among the mechanical fragmentation scales, crystallinity and enzymatic hydrolysis glucose yield of rice straw[J]. Bioresource Technology, 2017, **241**: 262-268. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.062.
- 14 Barakat A, Mayer-Laigle C, Solhy A, *et al.* Mechanical pretreatments of lignocellulosic biomass: towards facile and environmentally sound technologies for biofuels production[J]. RSC Advances, 2014, **4**(89): 48109-48127. DOI: 10.1039/C4RA07568D.
- 15 余燕燕, 李以琳, 楼雨寒, 等. 低共熔溶剂解离木纤维时木质素缩合对纤维素酶解的影响[J]. 林业工程学报, 2021, **6**(6): 101-108. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.202104022.
YU Yanyan, LI Yilin, LOU Yuhan, *et al.* Effect of lignin condensation on cellulose enzymatic hydrolysis during deep eutectic solvent fractionation of lignocellulose[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, **6**(6): 101-108. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.202104022.
- 16 Liu Y, Guo L J, Wang L Y, *et al.* Irradiation pretreatment facilitates the achievement of high total sugars concentration from lignocellulose biomass[J]. Bioresource Technology, 2017, **232**: 270-277. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.061.
- 17 Liu Y, Zhou H, Wang L Y, *et al.* Improving *Saccharomyces cerevisiae* growth against lignocellulose-derived inhibitors as well as maximizing ethanol production by a combination proposal of γ -irradiation pretreatment with *in situ* detoxification[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **287**: 302-312. DOI: 10.1016/j.cej.2015.10.086.
- 18 郭栋豪, 陈亮, 武小芬, 等. 辐照与粉碎对玉米秸秆酶解葡聚糖转化率的影响[J]. 河南农业科学, 2018, **47**(1): 139-144. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2018.01.025.
GUO Donghao, CHEN Liang, WU Xiaofen, *et al.* Effects

- of irradiation and smash on the glucan conversion rate by enzymatic hydrolysis of corn stalk[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2018, **47**(1): 139-144. DOI: 10.15933/j.cnki.1004-3268.2018.01.025.
- 19 武小芬, 陈亮, 齐慧, 等. 钴-60伽马射线辐照对甲酸分离玉米芯成分的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2018, **36**(1): 010402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.010402.
- WU Xiaofen, CHEN Liang, QI Hui, *et al.* Effect of cobalt-60 gamma-ray irradiation on separation of components from corncob by formic acid[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2018, **36**(1): 010402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2018.rj.36.010402.
- 20 Zhu L, Yu B, Chen H, *et al.* Comparisons of the micronization, steam explosion, and gamma irradiation treatment on chemical composition, structure, physico-chemical properties, and *in vitro* digestibility of dietary fiber from soybean hulls[J]. Food Chemistry, 2022, **366**: 130618. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130618.
- 21 张勇, 郭栋豪, 王克勤, 等. γ 射线辐照预处理玉米秸秆发酵产乙醇的研究[J]. 中国酿造, 2018, **37**(9): 58-61. DOI: 10.11882/j.issn.0254-5071.2018.09.012.
- ZHANG Yong, GUO Donghao, WANG Keqin, *et al.* Fermentation for ethanol production with γ ray irradiation-pretreated corn straw[J]. China Brewing, 2018, **37**(9): 58-61. DOI: 10.11882/j.issn.0254-5071.2018.09.012.
- 22 Islam S M M, Elliott J R, Ju L K. Minimization of fermentation inhibitor generation by carbon dioxide-water based pretreatment and enzyme hydrolysis of guayule biomass[J]. Bioresource Technology, 2018, **251**: 84-92. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.12.032.