东北农业科学　2025,50(5):115-121
Journal of Northeast Agricultural Sciences　DOI: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2025.05.018

柞蚕蚕沙总多糖的提取工艺及体外抗氧化活性研究

张春杨[1,2],黄丽艳[3],王　娣[2],张　月[2],钱　琨[2],朴玉兰[1]*
(1. 吉林农业科技学院,吉林 吉林 132109;2. 吉林省蚕业科学研究院,吉林 吉林 132012;3. 吉林农业大学食品科学与工程学院,长春 130118)

摘　要:以柞蚕蚕沙为原料采用加热回流法提取总多糖,考察提取过程中溶液pH值、提取温度、提取时间和料液比对总多糖得率的影响。在单因素试验的基础上,通过正交试验确定最佳提取参数。以1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)法和2,2′-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)法测定所得总多糖的体外抗氧化能力。结果表明,最优提取工艺为提取温度100 ℃,料液比1∶40,提取时间5 h,溶液pH值9.0。在该条件下,总多糖得率12.98%。所得柞蚕蚕沙总多糖具有良好的抗氧化活性,对DPPH自由基清除率和ABTS自由基清除率的半数效应剂量(EC_{50})分别为0.099 8、0.003 6 mg/mL。优化后的提取工艺稳定可靠,所得柞蚕蚕沙总多糖具有良好的体外抗氧化活性。

关键词:柞蚕蚕沙;总多糖;正交试验;DPPH;ABTS;抗氧化活性
中图分类号:S881.2;R284.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:2096-5877(2025)05-0115-07

Extraction Process and in Vitro Antioxidant Activity of Total Polysaccharides from Tussah Silkworm Excrement

ZHANG Chunyang[1,2], HUANG Liyan[3], WANG Di[2], ZHANG Yue[2], QIAN Kun[2], PIAO Yulan[1]*
(1. *Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin* 132109; 2. *Jilin Institute of Sericulture Science, Jilin* 132012; 3. *College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun* 130118, China)

Abstract: To extract total polysaccharides from tussah silkworm excrement, using heat reflux extraction, the effects of solution pH, extraction temperature, extraction time, and solid-liquid ratio on the total polysaccharide yield were investigated. Based on the results of single-factor experiments, the optimal extraction parameters were determined by orthogonal experiments. The in vitro antioxidant capacity of the obtained total polysaccharides was measured by the 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl(DPPH) method and 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt(ABTS) method. The optimal extraction conditions were as follows: extraction temperature of 100 ℃, solid-liquid ratio of 1:40, extraction time of 5 h, and solution pH of 9.0. Under these conditions, the total polysaccharide yield was 12.98%. The obtained total polysaccharides from tussah silkworm excrement had good antioxidant activity, and the half-maximal effective concentration(EC_{50}) for DPPH radical scavenging and ABTS radical scavenging were 0.099 8 mg/mL and 0.003 6 mg/mL, respectively. The optimized extraction conditions were stable and reliable, and the total polysaccharides obtained from tussah silkworm excrement exhibited good in vitro antioxidant activity.

Key words: Tussah silkworm excrement; Total polysaccharides; Orthogonal test; DPPH; ABTS; Antioxidant activity

柞蚕(*Antheraea pernyi*)是大蚕蛾科柞蚕属泌丝昆虫,柞蚕产业在茧丝生产领域占据重要地位,是农民致富、乡村振兴的特色产业。其副产物蚕沙年产量超10万t,但受野外放养模式限制,导致柞蚕蚕沙的收集和利用长期处于滞后状态。大量富含生物活性成分的柞蚕蚕沙被直接废弃填埋或仅作简单堆肥处理,利用率不足5%,造成生物质资源的严重浪费。反观家蚕(*Bombyx mori* Linnaeus)的蚕沙不仅是传统中药材,还在医药[1-2]、农业[3-4]、工业[5-6]多领域实现了系统化开发与应用。天然多糖是生物体内关键的功能分子[7],广泛分布于动物、植物、微生物体内,具有降血糖[8-9]、免疫调节[10-11]、抗氧化[12-13]等多种生理功

收稿日期:2025-05-20
基金项目:吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20230439KJ)
作者简介:张春杨(1992-),女,助理研究员,硕士,主要从事柞蚕资源综合利用研究。
通信作者:朴玉兰,E-mail:piaoyulan@jlnku.edu.cn

能。柞蚕蚕沙作为天然多糖潜在的优质来源，其多糖类成分的提取工艺及抗氧化活性尚未得到系统性探究。基于此，本研究以柞蚕蚕沙为原料，通过正交试验优化总多糖的提取工艺，并考察提取物的体外抗氧化活性，旨在挖掘柞蚕蚕沙的潜在功能和价值，为其从废弃物向高附加值资源转化提供技术支撑，构建以科技赋能为核心的价值实现路径[14]，推动柞蚕产业副产物综合利用的创新发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

五龄柞蚕蚕沙，由吉林省蚕业科学研究院提供。

1.2 试验方法

1.2.1 柞蚕蚕沙总多糖的提取工艺流程

柞蚕蚕沙→预处理(粉碎、过筛)→提取→离心过滤→浓缩→醇沉→离心沉淀→干燥→总多糖测定。

1.2.2 标准曲线绘制

采用苯酚-硫酸法测定总多糖含量[15]。精确称量50.0 mg的D-无水葡萄糖，用蒸馏水溶解并定容至50 mL，得到1 mg/mL的葡萄糖标准溶液用蒸馏水将其稀释成浓度分别为0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL的葡萄糖标准溶液。分别吸取1 mL葡萄糖系列标准溶液于15 mL离心管中，依次加入5%苯酚溶液1 mL后，迅速加入7 mL的浓硫酸并摇匀，将离心管置于80 ℃水浴锅中反应20 min，取出冷却后，利用BioTek多功能酶标仪[型号：Synergy H1SYNERGY H1，安捷伦科技(中国)有限公司]于490 nm光波下分别测定吸光度值并绘制标准曲线。

1.2.3 总多糖得率的计算

称取干燥后的柞蚕蚕沙总多糖样品，用蒸馏水配制成0.5 mg/mL的溶液，按照1.2.2步骤测定溶液吸光度，代入标准曲线计算出样品溶液的总多糖浓度C，并根据公式(1)计算总多糖得率。

$$柞蚕蚕沙总多糖得率(Y)=\frac{C\times V}{m}\times 100\%\cdots (1)$$

式中：C—多糖质量浓度(mg/mL)；m—样品质量(mg)；V—待测样品的溶液总体积(mL)。

1.2.4 单因素试验

1.2.4.1 提取温度对总多糖得率的影响

准确称取蚕沙1.00 g，加入蒸馏水20 mL，用酸度计(型号：phs-25，上海伟业仪器厂)调节溶液pH值至5.0，再用蒸馏水定容至30 mL，此时料液比为1∶30。分别在60、70、80、90、100 ℃下水浴提取4 h后测定总多糖得率。考察提取温度对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响。

1.2.4.2 溶液pH值对总多糖得率的影响

准确称取蚕沙1.00 g，按照料液比1∶30加入蒸馏水，调节溶液pH值分别为1.0、3.0、5.0、7.0、9.0，在90 ℃水浴下，提取4 h后测定总多糖得率。考察溶液pH值对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响。

1.2.4.3 提取时间对总多糖得率的影响

准确称取蚕沙1.00 g，按照料液比1∶30加入蒸馏水并调节溶液pH值至7.0，在90 ℃水浴下，时间分别为1、2、3、4、5 h进行提取，测定总多糖得率。考察溶液提取时间对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响。

1.2.4.4 料液比对总多糖得率的影响

准确称取蚕沙1.00 g，分别按照料液比1∶10、1∶20、1∶30、1∶40、1∶50加入蒸馏水并调节溶液pH值至7.0，在90 ℃水浴下，提取4 h后测定总多糖得率。考察料液比对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响。

1.2.5 正交试验设计

在单因素试验的基础上，以总多糖得率(Y)为评价指标，选取提取温度(A)、料液比(B)提取时间(C)和溶液pH值(D)4个因素为自变量，每个因素选取3个水平进行正交试验优化设计(表1)。

1.2.6 验证试验

根据正交试验总多糖得率的极差分析结果得

表1 正交试验设计表

Table 1 Three-factor three-level orthogonal table

水平 Standard	温度(A)/℃ Temperature	料液比(B) Solid-liquid ratio	提取时间(C)/h Extraction time	pH值(D) pH
1	80	1∶30	3	5.0
2	90	1∶40	4	7.0
3	100	1∶50	5	9.0

到柞蚕蚕沙总多糖最优提取工艺组合。按照此最优组合条件的提取温度、料液比、提取时间和溶液pH值进行3次平行试验,并计算3次试验的总多糖得率均值及相对标准偏差(RSD),验证该工艺的可行性和合理性。

1.2.7　柞蚕蚕沙总多糖抗氧化能力的测定

取柞蚕蚕沙20 g,按照正交试验优化后的提取条件提取蚕沙总多糖,测定其1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除能力、2,2′-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)自由基清除能力和总还原能力[16]。

1.2.7.1　DPPH自由基清除能力测定

将柞蚕蚕沙总多糖用蒸馏水稀释成0.01、0.02、0.10、0.20、0.50 mg/mL共5个浓度梯度备用。在96孔板中加样,待测样品组每孔加入0.25 mmol/L的DPPH工作液100 μL,待测样品100 μL;空白对照组每孔加入75%乙醇100 μL,待测样品100 μL;阴性对照组每孔加入DPPH工作液100 μL,纯水100 μL;室温避光反应30 min,用酶标仪在510 nm光波下分别测定吸光度,并按照公式:DPPH清除率=[(阴性对照-待测样品+空白对照)/阴性对照]×100%,计算出不同浓度样品DPPH的清除率[17]。以质量浓度为横坐标,清除率为纵坐标绘制曲线,计算出待测样品的半数效应剂量(EC_{50})。

1.2.7.2　ABTS自由基清除能力测定

将柞蚕蚕沙总多糖用蒸馏水稀释成0.003、0.006、0.010、0.012、0.020 mg/mL共5个浓度梯度备用。精密称量66.228 4 mg过硫酸钾,用蒸馏水配制成浓度为2.45 mmol/mL的溶液,再精密称量384.076 mg的ABTS粉末溶于100 mL过硫酸钾溶液中,得到7 mmol/mL的ABTS储备液。将ABTS储备液用蒸馏水稀释约100倍,使溶液在酶标仪730 nm光波下的吸光度值达到0.70±0.02,得到ABTS工作液。在96孔板中加样。待测样品组每孔加入190 μL的ABTS工作液,待测样品10 μL;空白对照组每孔加入190 μL纯水,待测样品10 μL;阴性对照组每孔加入190 μL ABTS工作液,纯水10 μL;避光反应6 min,在730 nm光波下测定吸光值。

按照公式:ABTS自由基清除率=[(阴性对照-待测样品+空白对照)/阴性对照]×100%,计算不同浓度样品的ABTS自由基的清除率。以质量浓度为横坐标,清除率为纵坐标绘制曲线,计算出待测样品的EC_{50}。

1.2.7.3　柞蚕蚕沙总多糖总还原能力的测定

将柞蚕蚕沙总多糖用蒸馏水配制成0、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mg/mL共7个质量浓度梯度备用。在0.5 mL不同质量浓度的样品溶液中加入pH值6.6的0.2 mol/L磷酸盐缓冲溶液2.5 mL,再加入1%铁氰化钾溶液2.5 mL后摇匀,于50 ℃水浴中反应20 min。再加入10%三氯乙酸溶液2.5 mL后室温静置20 min。取反应液2.5 mL,加入2.5 mL蒸馏水和0.5 mL的0.1%氯化铁溶液,混合均匀10 min后,于700 nm光波下测定吸光值[18],吸光值越大则还原能力越强。

2　结果与分析

2.1　标准曲线绘制

以葡萄糖质量浓度为横坐标,吸光度值为纵坐标,得到葡萄糖标准曲线如图1所示。其中:y=3.726 6x+0.038,R^2=0.998 5。

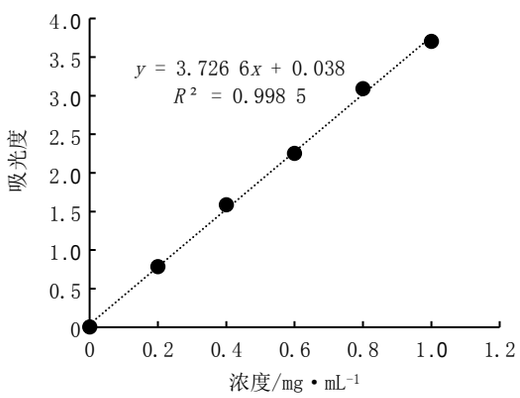

图1　葡萄糖标准曲线

Fig. 1 Glucose standard curve

2.2　单因素试验

2.2.1　提取温度对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响

由图2可知,随着提取温度增加,总多糖得率呈先升高后下降的趋势,当提取温度为90 ℃时,总多糖得率最高,达到10.05%,因此选择90 ℃为最佳提取温度。

2.2.2　溶液pH值对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响

由图3可知,随着溶液pH值的升高,总多糖得率呈先升高后下降的趋势,当pH值为7.0时,总多糖得率最高,达到9.52%,因此pH值7.0为最佳。

2.2.3　提取时间对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响

由图4可知,随着提取时间的延长,总多糖得率呈先升高后下降的趋势,当提取时间为4 h时,总多糖得率最高,达到10.05%,因此选择4 h为最佳提取时间。

2.2.4　料液比对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响

由图5可知,料液比从1∶10逐渐增加到1∶50

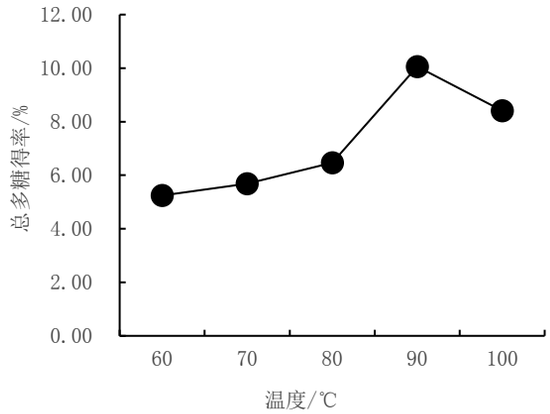

图2 提取温度对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响

Fig. 2 Effect of extraction temperature on the yield of total polysaccharides from Chinese oak silkworm excrement

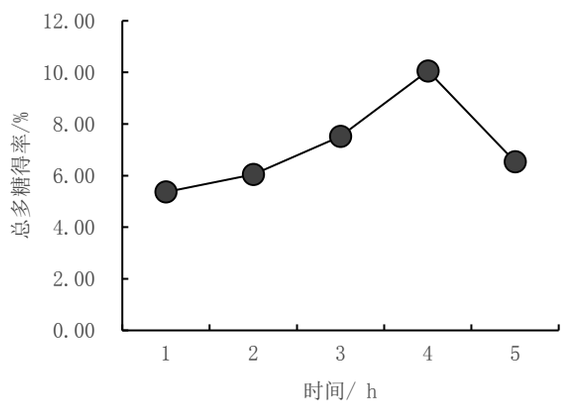

图4 提取时间对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响

Fig. 4 Effect of extraction time on the yield of total polysaccharides from Chinese oak silkworm excrement

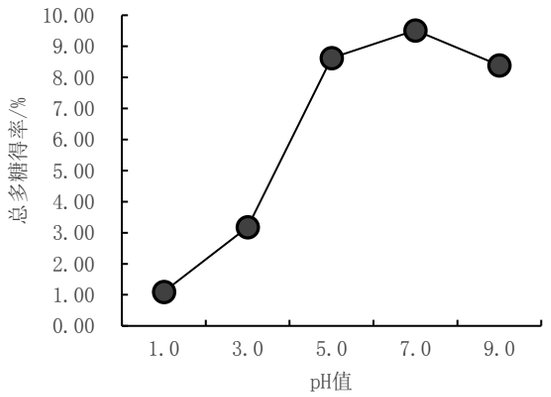

图3 溶液pH值对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响

Fig. 3 Effect of solution pH value on the yield of total polysaccharides from Chinese oak silkworm excrement

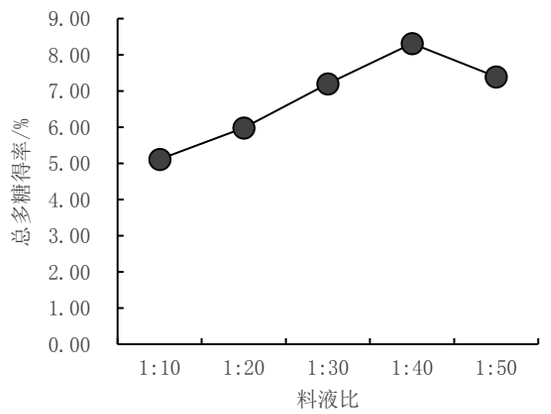

图5 料液比对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响

Fig. 5 Effect of material-liquid ratio on the yield of total polysaccharides from Chinese oak silkworm excrement

的过程中,总多糖得率呈先升高后下降的趋势,当料液比为1∶40时,总多糖得率最高,达到8.31%,因此选择1∶40为最佳提取料液比。

2.3 正交试验

由表2可知,各因素对柞蚕蚕沙总多糖得率的影响大小次序为B>D>A>C,即料液比对总多糖得率的影响最大,然后依次是pH值、提取温度和提取时间,根据极差分析结果可知,柞蚕蚕沙总多糖最优提取工艺为$A_3B_2C_3D_3$,而正交试验表中总多糖得率最大的组合为$A_3B_2C_1D_3$。

表2 正交试验结果表

Table 2 Orthogonal Test result

编号 No.	温度(A) Temperature	料液比(B) Solid-liquid ratio	时间(C) Extraction time	pH值(D) pH	总多糖得率/% Total polysaccharide yield
1	1	1	1	1	3.85
2	1	2	2	2	8.64
3	1	3	3	3	10.39
4	2	1	2	3	6.80
5	2	2	3	1	9.23
6	2	3	1	2	6.93
7	3	1	3	2	7.94

续表2

Table 2 Continued

编号 No.	温度(A) Temperature	料液比(B) Solid-liquid ratio	时间(C) Extraction time	pH值(D) pH	总多糖得率/% Total polysaccharide yield
8	3	2	1	3	12.66
9	3	3	2	1	8.86
K_1	22.88	18.59	23.44	21.94	–
K_2	22.83	30.53	24.30	23.51	–
K_3	29.46	26.18	27.56	29.85	–
k_1	7.63	6.20	7.81	7.31	–
k_2	7.61	10.18	8.10	7.84	–
k_3	9.82	8.73	9.19	9.95	–
R	2.21	3.98	1.37	2.64	–
优先级别			B>D>A>C		
因素次序			$A_3B_2C_3D_3$		

2.4　验证试验

按照$A_3B_2C_3D_3$条件做验证试验并计算3次平行试验结果的标准偏差(RSD)。结果表明,在提取温度100 ℃,料液比1∶40,提取时间5 h,溶液pH值9.0的工艺条件下,3次结果RSD为1.50%,总多糖得率为12.98%(表3),高于正交试验中得率最高的$A_3B_2C_1D_3$组合。说明利用正交试验预测的参数稳定可靠,在实际应用中具有一定的参考价值。

表3　验证试验结果分析表　　%

Table 3 Verification test result analysis table

序号 No.	总多糖得率 Total polysaccharide yield	均值 Mean value	标准偏差 RSD
1	13.18	12.98	1.50
2	12.97		
3	12.79		

2.5　柞蚕蚕沙总多糖抗氧化能力的测定

2.5.1　DPPH自由基清除能力

柞蚕蚕沙总多糖对DPPH自由基的清除曲线如图6所示,柞蚕蚕沙总多糖对DPPH自由基的清除能力呈现剂量效应,利用Graphpad Pism 8.0软件对曲线进行非线性拟合,得出柞蚕蚕沙总多糖对DPPH自由基的EC_{50}为0.099 8 mg/mL。

2.5.2　ABTS自由基清除能力

柞蚕蚕沙总多糖对ABTS自由基的清除曲线如图7所示,柞蚕蚕沙总多糖对ABTS自由基的清除率呈现剂量效应,对清除率曲线进行非线性拟合,得出柞蚕蚕沙总多糖对ABTS自由基的EC_{50}为0.003 6 mg/mL。

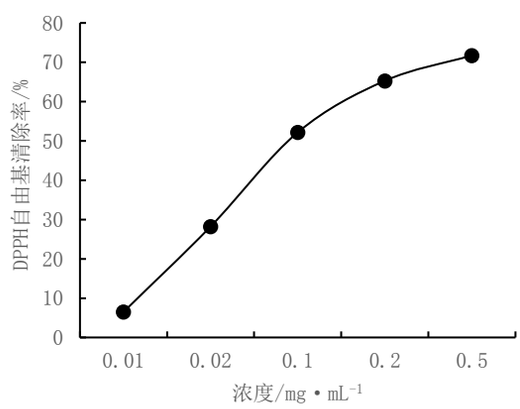

图6　DPPH自由基清除率曲线

Fig. 6 DPPH radical scavenging activity curve

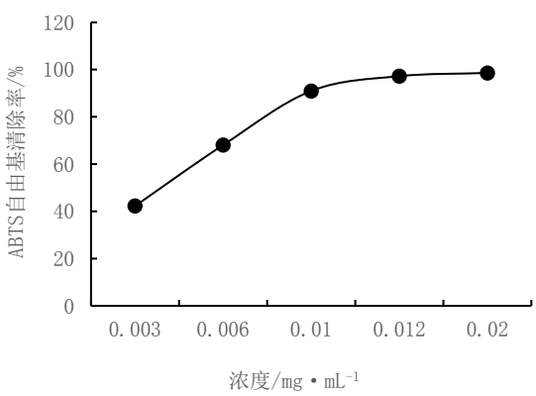

图7 ABTS自由基清除率曲线

Fig. 7 ABTS radical scavenging activity curve

2.6　柞蚕蚕沙总多糖总还原能力

以质量浓度为横坐标,吸光度值为纵坐标得

到柞蚕蚕沙总多糖总还原能力曲线如图8所示，随着样品浓度的增加，吸光度值逐渐升高，说明柞蚕蚕沙总多糖的总还原能力与质量浓度呈正相关，随着样品浓度的增加，柞蚕蚕沙总多糖的还原能力逐渐增强。

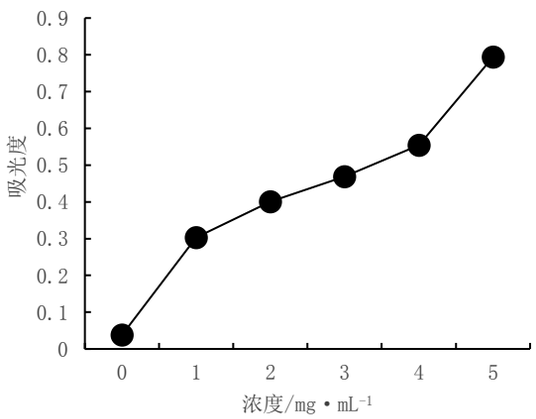

图8 总还原能力曲线

Fig.8 Total restoration capability curve

3 结论与讨论

以五龄柞蚕蚕沙为原料，通过单因素试验、正交试验优化设计，得到柞蚕蚕沙总多糖提取工艺的最优参数。在提取温度100 ℃，料液比1∶40，提取时间5 h，溶液pH值9.0的工艺条件下提取柞蚕蚕沙总多糖的得率可达12.98%，略高于郑天瑶等[19]测得家蚕蚕沙中可溶性多糖的含量，是岳冬梅等[20]测得柞树叶中粗多糖含量的5倍以上。栎属植物中多糖主要由葡萄糖、木糖、阿拉伯糖、鼠李糖、半乳糖、甘露糖等组成[21]。柞蚕以栎属植物的叶片为食，叶中多糖不仅有益于柞蚕的代谢活动和抗逆能力，在经柞蚕体内富集于蚕沙后更具有多种潜在生物活性。尽管近年有少数研究尝试提取蚕沙的活性成分(如黄酮类、多糖)[19,22]，但研究局限于实验室阶段，缺乏进一步的功效探讨与产品开发。柞蚕蚕沙总多糖展现出与桑叶多糖[23]相似的DPPH自由基清除能力，对ABTS自由基的清除能力显著优于桑叶多糖[24]，说明柞蚕蚕沙总多糖具有中和自由基、减少氧化应激的潜力。未来或可作为天然产物结合现代药理学和制剂技术应用于抗氧化相关的退行性疾病治疗[25-26]等领域。对柞蚕蚕沙的资源化开发不仅能够有效减少蚕沙自然分解过程中的碳排放，优化柞蚕行业的碳转移路径，增加碳循环的效率，打通柞蚕产业高质量发展的堵点卡点。还能为蚕农创造更多收益，推动产业的绿色转型和可持续发展。

参考文献：

[1] 张惠贞，张红，李伟，等. 基于PI3K/Akt/mTOR信号通路探讨蚕沙提取物对糖尿病胃轻瘫大鼠Cajal间质细胞的影响[J]. 中国实验方剂学杂志，2024，30(8)：66-73.
ZHANG H Z, ZHANG H, LI W, et al. Effect of faeces bombycis extract on cajal interstitial cells in diabetic gastroparesis rats based on PI3K/Akt/mTOR signaling pathway[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2024, 30(8): 66-73. (in Chinese)

[2] 刘琼，莫元森，宋治国. 蚕沙散热熨联合尪痹片口服治疗膝关节骨性关节炎寒湿痹阻型临床观察[J]. 实用中医药杂志，2024，40(2)：200-203.
LIU Q, MO Y S, SONG Z G. Clinical observation on the treatment of knee osteoarthritis of cold-dampness obstruction type with silkworm sand heat dissipation ironing combined with oral administration of Wangbi tablets[J]. Journal of Practical Traditional Chinese Medicine, 2024, 40(2): 200-203. (in Chinese)

[3] 符兵，周东来，李庆荣，等. 饲料育蚕沙发酵工艺优化[J]. 广东蚕业，2024，58(12)：1-3.
FU B, ZHOU D L, LI Q R, et al. Optimization of feed breeding sofa fermentation process[J]. Guangdong Sericulture, 2024, 58(12):1-3. (in Chinese)

[4] 倪惠菁，赵建诚，杨振亚，等. 蚕沙有机肥对雷竹林土壤理化性质和酶活性的影响[J]. 东北林业大学学报，2024，52(9)：109-114.
NI H J, ZHAO J C, YANG Z Y, et al. The effects of organic fertilizer derived from silkworm excrement on the soil physicochemical properties and enzyme activity of phyllostachys violascens 'prevernalis' forests[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(9):109-114. (in Chinese)

[5] 吴昊，秦瑞，李杨，等. 赤泥、蚕沙、硫酸亚铁复配钝化剂对铅锌矿污染土壤的修复[J]. 科学技术与工程，2024，24(36)：15725-15735.
WU H, QIN R, LI Y, et al. Remediation of lead zinc mine polluted soil with red mud, silkworm sand, ferrous sulfate passivating agents[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(36): 15725-15735. (in Chinese)

[6] 柳鑫华，石春杰，张源，等. 蚕沙提取物在盐溶液中的阻垢缓蚀性能研究[J]. 工业水处理，2024，44(7)：105-112.
LIU X H, SHI C J, ZHANG Y, et al. Study on scale inhibition and corrosion inhibition of silkworm sand extract in brine solution[J]. Industrial Water Treatment, 2024, 44(7): 105-112. (in Chinese)

[7] 王英骥，孙劲，周利平，等. 天然产物多糖构象研究[J]. 医学研究杂志，2024(12)：1-7.
WANG Y J, SUN J, ZHOU L P, et al. Study on the conformation of natural product polysaccharides[J]. Journal of Medical Research, 2024(12): 1-7. (in Chinese)

[8] 王晴，洪叶，柳振宇，等. 甘草多糖的抗氧化及降血糖作用研究[J]. 食品工业科技，2023，44(1)：398-404.
WANG Q, HONG Y, LIU Z Y, et al. Study on the antioxidant

and hypoglycemic effects of glycyrrhiza polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 398-404. (in Chinese)

[9] WEN Y, ZHOU Y, XU J, et al. Structural characterization and fermentation of a novel Moringa oleifera leaves polysaccharide with hypoglycemic effects[J]. Food Chemistry, 2025, 479: 143832.

[10] ABDIN M, ALNADARI F, EL-MASRY H G, et al. Structure characterization and rheological properties of novel polysaccharides extracted from mango seed kernel, and their effects on immunomodulation and human gut microbiota[J]. Food Chemistry, 2025, 479:143841.

[11] 刘杰,李柏珍,伍树松,等.枸杞多糖的生理功能及其在动物生产中的应用[J].动物营养学报,2023,35(4):2129-2142.
LIU J, LI B Z, WU S S, et al. Physiological functions of lycium barbarum polysaccharide and its application in animal production[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(4): 2129-2142. (in Chinese)

[12] JI X L, GUO J H, PAN F B, et al. Structural elucidation and antioxidant activities of a neutral polysaccharide from arecanut (*Areca catechu* L.)[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9:853115.

[13] 赵若含,赵净颖,柏毅承,等.绿藻多糖的生理功能及其在动物生产中的应用[J].饲料研究,2023,46(17):146-151.
ZHAO R H, ZHAO J Y, BAI Y C, et al. Physiological functions of green algal polysaccharide and its applications in animal production[J]. Feed Research, 2023, 46(17): 146-151. (in Chinese)

[14] 王依琳,张莉莉.新质生产力视角下农业碳汇价值实现路径探析[J].东北农业科学,2025,50(2):106-112.
WANG Y L, ZHANG L L.Exploring the realization path of agricultural carbon sink value from the perspective of new qualitative productive forces[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2025, 50(2): 106-112. (in Chinese)

[15] 刘晓星,李本丽,范小虎.不同有机肥对灵芝生长及品质的影响研究[J].东北农业科学,2025,50(2):85-92.
LIU X X, LI B L, FAN X H. Effects of different organic fertilizers on the growth and quality of *Ganoderma lucidum*[J].Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2025, 50(2): 85-92. (in Chinese)

[16] 穆霄鹏,付鸿博,郭晋鸣,等.外源脱落酸对欧李果实活性物质及抗氧化能力的影响[J].东北农业科学,2023,48(4):82-85.
MU X P, FU H B, GUO J M, et al. Effects of exogenous ABA on active substances and antioxidant ability of Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis*)[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(4):82-85. (in Chinese)

[17] 何畅,王景会,李达,等.分蘖洋葱黄酮体外抗氧化活性研究[J].东北农业科学,2020,45(6):135-139.
HE C, WANG J H, LI D, et al. Antioxidant activity of flavonoids from tillering onion *in vitro*[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(6): 135-139. (in Chinese)

[18] 殷金玲,马亮.金耳总黄酮的体外抗氧化作用[J].中国药物经济学,2024,19(3):105-108.
YIN J L, MA L.Antioxidant effect of total flavonoids of auriculus *in vitro*[J].China Journal of Pharmaceutical Economics, 2024, 19 (3): 105-108. (in Chinese)

[19] 郑天瑶,戴新新,宿树兰,等.不同产地、不同龄期蚕沙中多类型资源性化学成分的分析与评价[J].药物分析杂志,2019,39(4):624-637.
ZHENG T Y, DAI X X, SU S L, et al. Analysis and evaluation of multiple types of chemical constituents in silkworm excrement from different habitats and at different various instars[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2019, 39(4): 624-637. (in Chinese)

[20] 岳冬梅,王林美,李树英.五种柞树叶营养成分分析[J].北方蚕业,2017,38(4):20-23.
YUE D M, WANG L M, LI S Y.Nutrition contents analysis of five kinds of tussah leaves[J]. North Sericulture, 2017, 38(4): 20-23. (in Chinese)

[21] LEITE C, OLIVEIRA V, MIRANDA I, et al. Cork oak and climate change: Disentangling drought effects on cork chemical composition[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):7800.

[22] 高声鹏,苏鑫,阎祎鑫,等.柞蚕不同龄期蚕粪的特性及其主要成分的测定[J].中国蚕业,2021,42(3):43-46.
GAO S P, SU X, YAN Y X, et al. Characteristics of Chinese oak silkworm excrement at different growth stages and determination of their main components[J]. China Sericulture, 2021, 42(3): 43-46. (in Chinese)

[23] 黄雪娇,吴元辉,吴娟,等.紫金蜜桑叶活性成分的提取工艺优化及其抗氧化能力评价[J].现代食品科技,2021,37(6):193-200.
HUANG X J, WU Y H, WU J, et al. Optimizing the extraction of active compounds from *Morus macroura* and the evaluation of their antioxidant capacities[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(6): 193-200. (in Chinese)

[24] 韩晓云,郑丹,张雪瑶,等.寒地桑叶多糖化学组成及其生物活性分析[J].食品科学,2024,45(15):59-66.
HAN X Y, ZHENG D, ZHANG X Y, et al. Chemical composition and biological activity of polysaccharides from mulberry leaves grown in cold regions[J]. Food Science, 2024, 45(15): 59-66. (in Chinese)

[25] 李雨欣,易梦雅,李警耀,等.氧化应激及相关疾病的研究进展[J].承德医学院学报,2025,42(2):139-145.
LI Y X, YI M Y, LI J Y, et al. Research progress on oxidative stress and related diseases[J]. Journal of Chengde Medical College, 2025, 42(2): 139-145. (in Chinese)

[26] 许莞菁,孙雨浩,赵军.姜黄素的抗氧化性对视网膜退行性疾病的影响[J].山东大学耳鼻喉眼学报,2025,39(1):146-151.
XU W J, SUN Y H, ZHAO J. The antioxidant properties of curcumin and its impact on retinal degenerative diseases[J]. Journal of Otolaryngology and Ophthalmology of Shandong University, 2025, 39(1): 146-151. (in Chinese)

(责任编辑:范杰英)