ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

生物酶脱墨绿色升级的经济可行性与回收体系仿真优化基于废纸供应链视角

钟紫茵 黄 嫣 陆秀芬 *

南宁学院，广西 南宁 530200

摘 要：废纸再生是缓解纤维资源短缺的重要途径，传统化学脱墨存在碱用量大、污染重等问题。本文从废纸供应链视角构建系统成本模型，比较化学法与生物酶法的全流程经济表现，并采用情景仿真识别关键参数。基准情景下两路线企业口径吨浆成本接近（化学法 1297.45 元 /t，酶法 1297.77 元 /t），计入减排收益后酶法绿色成本降至 1271.97 元 /t，具有明显绿色经济优势。提升回收率、降低收集半径和外部收益内部化是推动其经济可行的关键路径。

关键词：废纸脱墨；生物酶；供应链；经济可行性；仿真优化

DOI：10.64649/yh.shfzykjcx.issn3078-8994.202610021

0 引言

我国造纸工业高度依赖废纸再生，禁止废纸进口政策实施后，国内废纸回收体系的重要性显著上升 [1]。脱墨是废纸回用的核心环节，传统化学法废水污染重、处理成本高 [2]，而生物酶脱墨反应温和、选择性高，是绿色升级的重要方向 [3]。现有研究多聚焦工艺优化，较少从供应链角度核算其经济可行性。本文将供应链结构与经济测算结合，识别生物酶脱墨绿色升级的可行边界与优化方向。

1 研究基础与文献综述

1.1 生物酶脱墨的绿色效益

生物酶脱墨利用纤维素酶、木聚糖酶、漆酶和角质酶等水解油墨连接料，削弱油墨与纤维的结合 [2][3]。酶法可在近中性、低温下运行，COD 较化学法低约 34%，BOD5 低约 40%，纸浆品质也有所改善 [4]。酶与表面活性剂、超声协同可进一步提高脱墨效率。

1.2 废纸回收供应链与经济研究

废纸回收涉及回收、分选、运输、制浆、脱墨和回用多个节点。禁止废纸进口后，回收网络布局与分选效率成为影响再生纤维成本的关键因素 [5]。国内研究多从循环经济效率 [6] 和绿色技术创新影响 [7] 切入，但较少把酶脱墨作为具体工艺节点与供应链联动分析 [8]。

2 分析框架与模型构建

2.1 系统边界与模型

本文系统边界为一个区域废纸回收供应链，包含回收、分选、运输、化学或酶法脱墨、废水处理与污泥资源化，目标产品为年产 50 万 t 脱墨浆。关键变量为回收率 R、收集半径 d、分选质量 q 和酶法处理比例 p（图 1）。成本包括原料供应与脱墨工序两部分；后者含化学品 / 酶制剂、能耗、废水、人工和污泥处置，资源化收入按负成本计入（表 1）。模型设定区域年可回收废纸量 120 万 t，脱墨浆产率 0.75，分选损耗 8%。

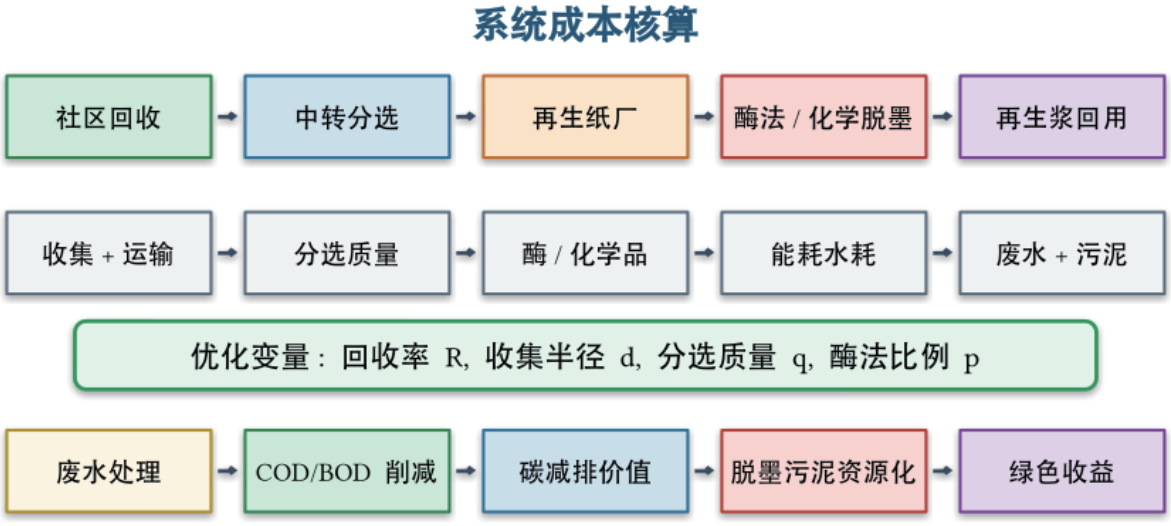


图1 废纸回收供应链与生物酶脱墨绿色升级系统框架

ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

3 经济可行性测算

3.1 基准情景比较

基准情景参数为 R=0.65、d=40 km、q=0.91、p=1、酶制剂价格 212 元 /t、碳价 60 元 /t。化学法吨浆成本为 1297.45 元 /t，酶法为 1297.77 元 /t，相差不足 0.3 元 /t，企业口径基本持平。酶法能耗与废水处理费用分别下降 30 元和 47 元，基本抵消了酶制剂增量。计入 COD/BOD 削减和碳减排收益后，酶法绿色成本降至 1271.97 元 /t，较化学法低 25.5 元 /t。

表1 基准情景下化学脱墨与生物酶脱墨经济核算

项目	化学脱墨	生物酶脱墨
系统单位成本 /(元 · t^{-1})	1297.45	1297.77
原料供应成本 /(元 · t^{-1})	787.45	787.45
脱墨工序成本 /(元 · t^{-1})	510.0	510.32
绿色成本 /(元 · t^{-1})	1297.45	1271.97
较化学法差异 /(元 · t^{-1})	0	+0.32
优势环节	化学品价格低	能耗、废水成本低

3.2 敏感性分析

关键参数敏感性见图 2。收集半径每扩大 50 km，成本由 1226 元 /t 升至 1405 元 /t，影响最大；酶制剂价格每变化 170 元 /t，成本在 1236 至 1406 元 /t 之间波动；回收率由 55% 升至 75%，成本由 1379 元 /t 降至 1288 元 /t。分选质量影响温和，酶法处理比例的影响不足 1 元 /t。

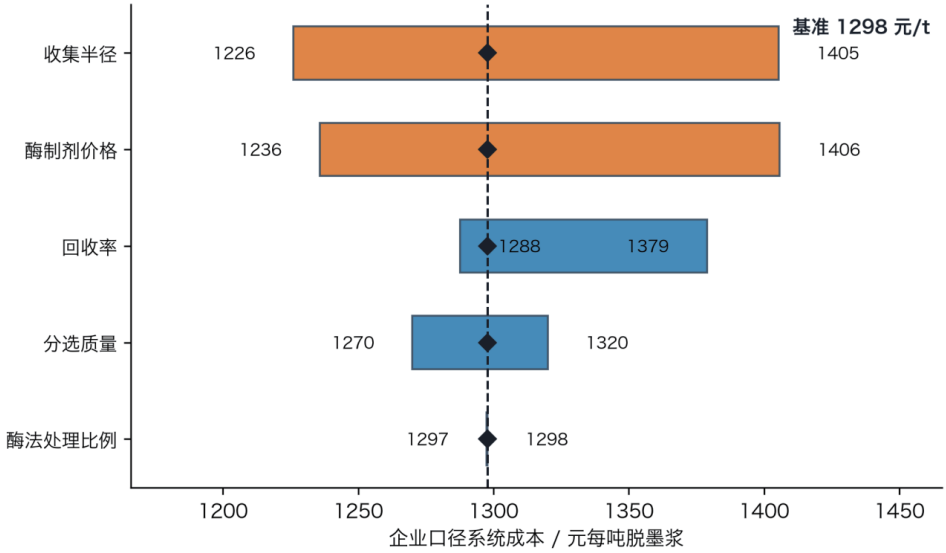


图2 关键参数敏感性分析

4 回收体系仿真与优化

4.1 回收率与酶法比例情景

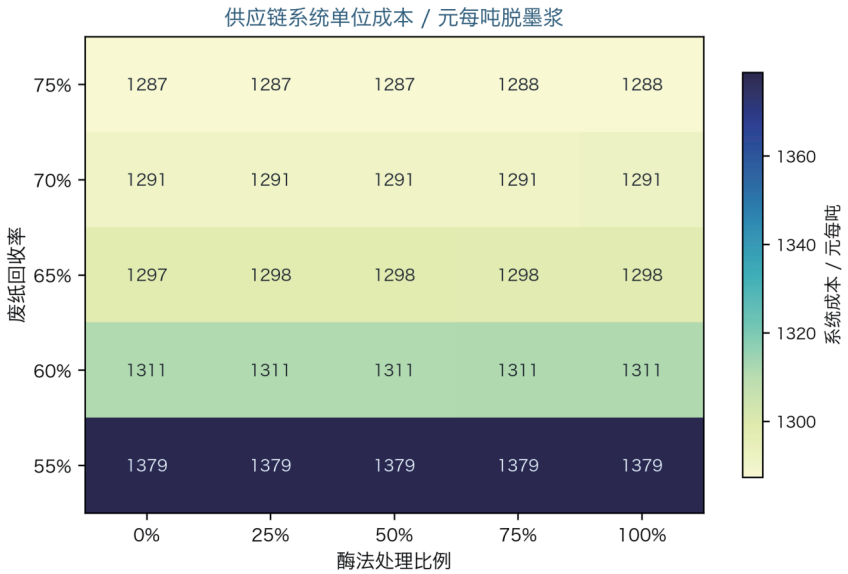


图3 回收率与酶法处理比例的系统成本热力图

ISSN：3078-8994
EISSN：3104-4492

图 3 给出了不同 R 与 p 组合下的系统单位成本。系统成本对回收率高度敏感，对酶法比例几乎不敏感：回收率由 55% 升至 75%，成本从 1379 元 /t 降至 1287 元 /t，降幅约 6.6%；酶法比例从 0% 到 100% 差异不足 1 元 /t。这说明在环境收益未内部化时，企业替代化学法的动力不强；一旦通过碳价、补贴或排污收费将外部收益内部化，酶法即可成为可行选择。

4.2 政策情景与不确定性

碳价由 0 升至 200 元 /t 时，酶法绿色成本由 1282.77 元 /t 降至 1246.77 元 /t，较化学法基准成本的优势从 14.7 元 /t 扩大至 50.7 元 /t。蒙特卡洛模拟显示，企业口径成本中位数 1332.5 元 /t，绿色口径中位数 1312.8 元 /t，酶法成本低于化学法的概率从 18.6% 升至 52.2%。

5 讨论与对策

生物酶脱墨的经济可行性取决于供应链成本与环境收益的统筹。应提升废纸回收率，并将收集半径控制在 30 至 50 km 以内；通过规模化、复合酶与固定化酶技术降低酶制剂单价；完善绿色脱墨认证、碳减排收益内部化和废水处理费减免等政策，使环境收益在财务报表中显性化。

6 结论

从废纸供应链视角看，生物酶脱墨绿色升级在技术上减排优势明显，经济上取决于回收体系与外部收益内部化程度。企业口径下酶法与化学法成本基本持平，但计入环境价值后酶法优势明显。应同步提升回收率、控制收集半径、完善绿色激励政策，推动技术与制度协同升级。

参考文献：

[1] 丁凯凯，张国宏，张鑫淼，等．生物酶在废纸脱墨中的应用综述 [J]. 造纸装备及材料，2024, 53(11): 1−4.

[2] 吕文志，曹双封，李晓凤，等．酶在废纸回用生产中的应用研究及进展 [J]. 中国造纸学报，2021, 36(3): 9−16.

[3] 王凤，龙柱，吴美燕，等．角质酶 / 表面活性剂体系对混合办公废纸的协同脱墨作用 [J]. 化工学报，2017, 68(12): 4750−4755.

[4] Enzymatic and chemical deinking of mixed office wastepaper and old newspaper: paper quality and effluent characteristics[J]. BioResources, 2011, 6(4): 3859−3875.

[5] How China's foreign waste ban will reshape the U.S. recycling supply chain: economic and environmental considerations[J]. BioResources, 2022, 17(2): 3178−3201.

[6] 陈翔，肖序．中国工业产业循环经济效率区域差异动态演化研究与影响因素分析——来自造纸及纸制品业的实证研究 [J]. 中国软科学，2015,(1):160−171.

[7] 郭政华，王智垚．造纸产业经济效益受绿色技术创新应用的影响研究 [J]. 造纸科学与技术，2025, 44(12): 168−170.

[8] 杨臻，汪家全．基于循环经济的再生纸利用效率及其生态价值研究 [J]. 纸和造纸，2025, 44(6): 72−74.

作者简介：钟紫茵（2004.01—），女，汉族，广东茂名人，本科，研究方向：资源循环利用与供应链经济分析。

项目信息：广西大学生创新创业训练计划《酶力新生》编号：S202511549076。