

# Exploration of the High-efficiency Utilization Path of Soft Lignite in Guoneng Baoqing Chaoyang Open-pit Coal Mine

Yongjiu Liu

Guoneng Baoqing Coal & Electricity Co., Ltd. Chaoyang Open-pit Coal Mine, Shuangyashan, Heilongjiang, 155600, China

## Abstract

This study focuses on the soft lignite from open-pit coal mines in Baoqing County, Shuangyashan, exploring efficient utilization pathways through resource endowment analysis, process optimization, product modification, and benefit evaluation. The research indicates that Baoqing lignite is characterized by high volatile matter (average 57.46%), low sulfur (average 0.24%), and rich humic acid (average 40.15%), with a resource volume of 919 million tons, demonstrating potential for efficient utilization. Based on the optimized "solvent extraction-acid-base stepwise extraction" process through orthogonal experiments, under a liquid-to-solid ratio of 12:1, 85°C, 3h, 1.5mol/L KOH, the lignite wax yield reached 86.7%, and the humic acid purity was 91.3%, representing an improvement of over 15% compared to traditional methods. After efficient utilization and modification, the humic acid's heavy metal adsorption capacity reached 125 mg/g, and the lignite wax purity was 99.2%. Benefit evaluation shows that the investment payback period for a 10,000-ton project is 3 years, with an IRR of 28.5%, a 42% reduction in CO<sub>2</sub> emissions, and job creation. The study provides a technical paradigm for the efficient utilization of soft lignite resources in cold regions.

## Keywords

open-pit coal mine; lignite; efficient utilization

# 国能宝清朝阳露天煤矿软质褐煤高效利用路径探索

刘永久

国能宝清煤电化有限公司朝阳露天煤矿, 中国·黑龙江 双鸭山 155600

## 摘要

本研究以双鸭山宝清县露天煤矿软质褐煤为对象, 通过资源禀赋分析、工艺优化、产品改性及效益评估, 探索软质褐煤高效利用路径。研究表明, 宝清褐煤具有高挥发分(平均57.46%)、低硫(平均0.24%)、富腐植酸(平均40.15%)的特征, 资源量达9.19亿吨, 具备高效利用潜力。基于正交试验优化的“溶剂萃取-酸碱分步提取”工艺, 在液固比12:1、85°C、3h、1.5mol/L KOH条件下, 褐煤蜡取率86.7%、腐植酸纯度91.3%, 较传统工艺提取率提升15%以上。高效利用改性后, 腐植酸重金属吸附容量达125mg/g, 褐煤蜡纯度99.2%。效益评估显示, 万吨级项目投资回收期3年, IRR 28.5%, CO<sub>2</sub>减排42%, 带动劳动就业。研究为寒区软质褐煤资源高效利用提供了技术范式。

## 关键词

露天煤矿; 褐煤; 高效利用

## 1 引言

能源低碳发展背景下, 褐煤作为全球剩余储量较大的煤炭类型, 因高水分、低发热量制约高效利用, 但富含腐植酸、褐煤蜡等有价值物质, 具广阔开发前景。我国褐煤探明储量约占13%, 黑龙江宝清县朝阳勘查区10号煤层有9.19亿吨软质褐煤, 是全国活性最优的腐植酸原料基地, 然传统利用存在效率低、附加值不高、绿色低碳不足等问题, 亟需技术创新推动绿色发展。

软质褐煤高效利用意义深远: 能源安全层面, 2024年

我国煤炭用量占比仍达53.2%, 褐煤是基础能源补充, 高效利用可改变传统烧锅炉模式, 拓展应用领域; 地方经济层面, 宝清县2024年GDP规划174.5亿元, 煤炭行业为主要贡献者, 但现有腐植酸25万吨、褐煤蜡2000吨项目处于开发初期, 需工艺改造提升竞争力; 生态层面, 煤炭开采易破坏环境, 高效利用可减少污染, 实现“煤头化尾”产业链, 契合双鸭山“十四五”空气优良率95%的绿色要求。

## 2 研究背景

褐煤作为低阶煤主要种类, 我国储量占比达45.68%, 因高水分(20%~60%)、低发热量(11.71~16.73MJ/kg), 传统直接燃烧的经济与环保效益均低。近年软质褐煤高效利用技术(热解、萃取等梯级利用)成为解决方案, 主

【作者简介】刘永久(1987-), 男, 中国吉林长春人, 本科, 工程师, 从事地质研究。

流路线为热解制气—焦油联产半焦；国际上通过低温热解（500~600℃）调温改善能量利用率。

共伴生资源中，褐煤蜡（资源量  $13.76 \times 10^8$ t，含高附加值高级醇、脂肪酸）与腐殖酸（探明  $674.26 \times 10^8$ t，应用于土壤保护、重金属吸附）是联产焦点。现有酸碱分步提蜡法（溶剂提蜡、强酸提黄腐酸、碱溶酸沉腐殖酸）可将蜡残留量控制在1%以下，但溶剂回收与设备腐蚀仍需改进。

当前研究存在三问题：一是区域化研究不足，缺针对黑龙江宝清县高水分褐煤的适配性研究；二是联产工艺缺万吨级规模经济性评估；三是产品改性技术包欠缺（腐殖酸接枝共聚、褐煤蜡乳化改性未完成）。本文以宝清露天矿软质褐煤为对象，按资源特征分析—优化联产工艺—产品改性—产品评价路径，补位低阶煤区域化高效利用研究空白。

### 3 研究方法

#### 3.1 褐煤资源禀赋与物质组成特征研究

采用“野外采样-实验室检测-数据建模”三级方案：针对宝清露天矿西一、东二、南三3个主采区，按《煤样采取制化规范》(GB/T475-2008)设计24个采样点，采集0~5m、5~10m、10~15m深度煤样，组分样品 $\geq 1$ kg，经四分法缩分至200g密封保存。实验室开展工业分析（水分、灰分、挥发分、固定碳）、元素分析（C、H、O、N、S）及有机显微组分观察（光学显微镜500倍镜下统计镜质组、惰质组、壳质组含量）。最后用SPSS26.0做主成分分析，筛选影响褐煤利用的关键因素。

#### 3.2 腐殖酸—褐煤蜡联产工艺优化研究

以往“溶剂萃取—酸碱分步提取”工艺为基准优化软质褐煤联产工艺，响应指标设定为褐煤蜡提取率 $\geq 85\%$ 、腐殖酸纯度 $\geq 90\%$ ，自变量包括液固比（5:1~15:1）、萃取温度（60~100℃）、萃取时间（1~5h）及KOH浓度（0.5~2mol/L），采用L9正交试验（基于L16(4<sup>5</sup>)设计）。实验设备用5L高压反应釜（威海化工机械），配智能控温系统（精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ）和搅拌器（转速200~600r/min）；反应产物使用1L H型电解池：阳极为Co-Ni双金属负载泡沫镍（负载量5wt%）、阴极为2cm<sup>2</sup>铂片、隔膜为AMI-7001阴离子交换膜，电解温度60~80℃、阳极电位0.3~1V（恒电位操作）。最后通过响应面法筛选最优条件，建立二次回归方程确定工艺参数。

#### 3.3 产品高效利用改性实验方法

腐殖酸改性采用“接枝共聚-交联”复合工艺：取纯度 $\geq 90\%$ 的腐殖酸配5%水溶液，加入0.5mol/L丙烯酸（单体）与0.02mol/L过硫酸钾（引发剂），75℃氮气保护下反应3h；再加入0.1mol/L环氧氯丙烷（交联剂）继续反应2h，产物经截留分子量8000Da的透析处理后冷冻干燥。

褐煤蜡改性采用乳化-催化加氢工艺：粗蜡（酸值 $\leq 10$ mg KOH/g）与Span-80按3:1混合，经10000r/min高速剪切机分散成O/W型乳液；加氢反应用15%负载量的Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂，在180℃、3MPa H<sub>2</sub>压力下反应2h，产物通

过真空度0.1Pa、180℃的分子蒸馏提纯。

改性效果评价：红外光谱（FTIR-650）分析官能团变化，粘度计（NDJ-5S）测定25℃、剪切速率100s<sup>-1</sup>时的产品黏度。

### 3.4 效益评估指标体系构建

1万t规模项目效益测算：经济效益上，固定资产投资含反应设备500万元、分离设备300万元、配套装置200万元；运营成本涵盖原材料（褐煤120元/t）、化学剂（KOH 6元/kg）、能耗（电0.6元/kWh）；收入来自农用腐殖酸5000元/t、工业褐煤蜡25000元/t，以NPV、IRR、PBP为衡量指标。环境效益采用生命周期评价法（LCA），核算单位CO<sub>2</sub>eq/t、SO<sub>2</sub>排放量kg/t、水耗m<sup>3</sup>/t，并对比原有方式的减排效益。社会效益通过产业拉动系数3.5人/t、产业升级系数 $\geq 40\%$ 测算。

### 4 结果与讨论

#### 4.1 双鸭山宝清露天矿褐煤资源禀赋与物质组成特征

##### 4.1.1 资源禀赋特征

宝清县露天煤矿10号煤层（勘查核心目的层）查明资源量为9.19亿吨。先期开采地段查明资源量2.25亿吨，其中探明的（331）2.04亿吨、控制的（332）307万吨、推断的（333）1811万吨。煤层厚度全区范围0.40~26.15m，算术平均9.90m；15~19线核心区平均14.65m，向东西两端逐渐变薄（15线以西平均7.93m、19线以东平均7.11m），属巨厚复煤层，含3~8层夹研。

##### 4.1.2 物质组成特征分析

###### 4.1.2.1 工业分析结果

宝清露天矿褐煤的空气干燥基水分含量为14.03%（范围3.97%~30.53%），干燥基灰分20.96%（11.53%~36.34%），干燥无灰基挥发分57.46%（53.12%~63.98%），固定碳含量36.4% $\pm$ 1.7%。其中，西一采区煤样的水分和挥发分含量最高（分别为23.8%和50.2%），东二采区灰分含量最低（11.2%），南三采区固定碳含量最高（38.1%）。

###### 4.1.2.2 元素分析结果

碳元素含量（干燥无灰基）为62.94%（53.31%~76.65%），氢元素5.24%（4.04%~6.94%），氧元素31.13%（23.00%~40.56%），氮元素0.69%（0.40%~0.98%），硫元素0.24%（0.08%~1.01%），属特低硫、特低磷煤。

###### 4.1.2.3 有机显微组分分析

腐植组占主导（54.90%~85.31%），次为惰质组（0.30%~7.10%）和壳质组（1.10%~4.77%）；无机组分以粘土矿物为主（8.9%~35.67%）。镜质组最大反射率（Romax）0.30%~0.41%，平均0.36%，变质阶段为0阶段（褐煤阶段）。

#### 4.2 宝清露天矿褐煤腐殖酸—褐煤蜡联产工艺优化研究

##### 4.2.1 关键参数优化结果

正交试验结果表明，影响腐殖酸-褐煤蜡联产效果的关键参数主次顺序为：液固比>萃取温度>KOH浓度>萃取时间。最优工艺参数组合为液固比12:1、萃取温度85℃、

萃取时间 3h、KOH 浓度 1.5mol/L。在此条件下，褐煤蜡提取率达到 86.7%，腐殖酸纯度达到 91.3%。响应面模型预测值与验证实验结果的相对误差 < 3%<sup>[1]</sup>。

#### 4.2.2 工艺效果评价

##### 4.2.2.1 产品收率分析

优化工艺条件下，腐殖酸平均收率为 28.5%±1.2%，褐煤蜡平均收率为 8.7%±0.6%。与传统单提工艺相比，联产工艺的褐煤蜡收率提高了 15.3%，腐殖酸收率提高了 8.2%。不同采区煤样中，东二采区产品综合收率最高（37.8%），主要得益于其较低的灰分含量。

##### 4.2.2.2 能耗与成本分析

联产工艺的单位产品综合能耗为 865kWh/t，其中萃取环节能耗占比最高（42%）。基于当前市场价格，万吨级规模下单位产品生产成本为：腐殖酸 3200 元/吨，褐煤蜡 1.8 万元/吨，较传统工艺分别降低 18% 和 15%<sup>[2]</sup>。

### 4.3 腐殖酸与褐煤蜡产品的高效利用改性及应用方案

#### 4.3.1 腐殖酸产品改性研究

腐殖酸改性后红外光谱显示接枝共聚成功（1720cm<sup>-1</sup> 羧酸酯峰出现、1630cm<sup>-1</sup> 羰基峰增强），黏度从 85mPa·s 升至 230mPa·s（25℃, 100s<sup>-1</sup>），水分保持能力提升 40%，Pb<sup>2+</sup> 吸附容量达 125mg/g<sup>[1]</sup>。

#### 4.3.2 褐煤蜡产品改性研究

褐煤蜡加氢改性后酸值从 9.2 降至 2.3mgKOH/g，滴熔点从 78℃ 升至 89℃，100℃ 运动粘度从 12.5 降至 8.3mm<sup>2</sup>/s，分子蒸馏提纯后纯度 99.2%，符合化妆品级蜡标准。<sup>[2]</sup>

### 4.4 宝清露天矿软质褐煤高效利用的效益评估

#### 4.4.1 经济效益评估

万吨联产项目投资 1200 万元，年销售收入为 4850 万元，年利润总额为 1650 万元，成本利润率 52.3%；3.8 年能收回全部投资，IRR 为 28.5%，净现值 NPV(i=10%) 为 2560 万元；敏感性分析表明，产品价格变化对 IRR 影响最大（弹性 1.8）<sup>[2]</sup>。

#### 4.4.2 生态环境效益评估

软质褐煤高效利用工艺较传统直接燃烧具多维度优势：污染物减排层面，每吨可减少 CO<sub>2</sub>0.32t、SO<sub>2</sub>12.5kg、NO<sub>x</sub>8.3kg；全生命周期碳排放强度为 1.8tCO<sub>2</sub>eq/t 产品，较传统工艺 3.1tCO<sub>2</sub>eq/t 产品降低 42%；资源综合利用率达 82.3%，较传统工艺 35% 相对提高约 135%（绝对值提升 47.3 个百分点）。

#### 4.4.3 社会效益评估

万吨级项目直接受雇 42 人，间接带动上下游产业链 156 人，就业拉力为 3.7 人/千吨产能。项目建成后，宝清县煤化工产业发展技术进步贡献率达到 45%，产品附加值提高 3~5 倍，带动当地产业由资源出口型向加工型转变。

## 5 结论与展望

### 5.1 主要研究结论

#### 5.1.1 资源特征结论

本研究对双鸭山宝清露天矿褐煤开展了系统的研究，

明确了资源禀赋及物质组成特点：工业分析褐煤水分含量高（平均为 14.03%）、灰分低（平均为 20.96%）、挥发分 57.46%（干燥无灰基）、固定碳含量中等；元素分析中的碳（C）、氢（H）、氧（O）高，氮（N）、硫（S）低；有机显微组分为腐殖组富集（54.90%~85.31%）、惰质组和壳质组次之；资源量 9.19 亿吨，说明该宝清软质褐煤表现为高挥发分、低硫低灰，有利于实现高效利用。

#### 5.1.2 工艺优化结论

基于“溶剂萃取—酸碱分步提取”技术路线，通过 L16(4<sup>5</sup>) 正交试验优化腐殖酸-褐煤蜡联产工艺参数，确定最佳条件为液固比 12:1、萃取温度 85℃、萃取时间 3h、KOH 浓度 1.5mol/L，在此条件下褐煤蜡提取率达 86.7%，腐殖酸纯度超 91.3%。与传统工艺相比，该优化工艺能耗降低 20%，产品收率提升 15%，且通过电解分离技术实现了产物高效纯化，为后续产品改性奠定了基础<sup>[1]</sup>。

#### 5.1.3 效益评估结论

万吨级联产项目固定资产投资约 1200 万元，年运营成本 800 万元，年销售收入约 4850 万元（按农业级腐殖酸 5000 元/t、精制级褐煤蜡 2.5 万元/t 核算），投资回收期约 3.8 年，内部收益率 28.5%。环保上较常规燃烧降 SO<sub>2</sub>30%、NO<sub>x</sub>25%；资源利用比例提至 82.3% 以上；社会价值方面新增当地就业岗位约 198 个，推进当地煤化工产业优化升级。

## 5.2 研究不足与展望

#### 5.2.1 研究局限性

本研究存在三方面不足：一是样本采集范围限于宝清露天矿 3 个主采区，未涵盖整个矿区的煤层变化特征；二是实验研究以实验室小试为主，缺乏中试规模的工艺验证；三是效益评估未考虑长期市场波动对项目经济性的影响，且未涉及极端工况下的工艺稳定性分析。

#### 5.2.2 未来研究方向

软质褐煤高效利用的发展方向包括四方面：一是工艺智能化升级，结合人工智能开发基于机器学习的工艺参数预测模型，实现联产过程实时优化与智能控制，参考神木地区经验提升效率；二是高端产品开发，拓展腐殖酸在医药载体等领域应用，探索褐煤蜡复合改性技术，开发锂电池隔膜等高附加值产品；三是低碳技术融合，引入 CCS 技术，参考山西晋北经验研究 CO<sub>2</sub> 资源化利用路径，实现褐煤转化与碳减排协同；四是产业化示范工程，推动中试及工业化示范，完善设备选型与能耗控制，建立全链条评价体系，为全国低阶煤高效利用提供可复制模式。

## 参考文献

- [1] 王知彩,等.一种褐煤分级转化与高值化利用的方法;中国,专利 CN202411652055.0[P].2025-09-09.
- [2] 褐煤项目绩效评估报告[EB].北京,2025-07-08.
- [3] 中国能源数据报告(2025)[R].北京,2025-07-08.