

人工智能在钾肥生产工艺优化中运用及经济价值

苑海青（青海东台吉乃尔锂资源股份有限公司，青海 格尔木市 816000）

摘要：钾肥需求随农业发展激增，传统工艺依赖经验，效率低、成本高，人工智能可整合数据优化流程，破解资源利用率低等难题，成为工艺升级关键，文章聚焦人工智能在钾肥生产工艺优化中的运用，探讨其通过数据挖掘、智能决策等方式，提升钾肥生产效率与质量的经济价值。结合开展的盐田、浮选、结晶等重点工段智能化试点项目背景，分析人工智能在工艺参数优化、生产流程调控等方面的应用潜力，为钾肥生产工艺的革新提供方向，通过案例实证其对钾肥产业可持续发展的推动作用，促进行业良好发展。

关键词：人工智能；钾肥生产；工艺优化；经济价值；行业发展

中图分类号：S143.3 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)032-0037-03

Research on the Application of Artificial Intelligence in the Optimization of Potassium Fertilizer Production Process

Yuan Haiqing (Qinghai Dongtai Jinaier Lithium Resources Co., LTD, Golmud Qinghai 816000, China)

Abstract: The demand for potassium fertilizer has soared with the development of agriculture. Traditional processes rely on experience, which is inefficient and costly. Artificial intelligence can integrate data to optimize processes and solve problems such as low resource utilization. It has become a key to process upgrading. This paper focuses on the application of artificial intelligence in the optimization of potassium fertilizer production processes, exploring how it can enhance the efficiency and quality of potassium fertilizer production through data mining, intelligent decision-making, and other methods. Combined with the background of winter brine evaporation and crystallization experiments and other related processes, it analyzes the application potential of artificial intelligence in process parameter optimization and production process control, providing a direction for the innovation of potassium fertilizer production processes. Through case studies, it is demonstrated that it promotes the sustainable development of the potash fertilizer industry and facilitates the healthy growth of the sector.

Keywords: Artificial Intelligence; Potassium Fertilizer Production; Process Optimization; Economic value; Industry development

钾肥是农业生产必不可少的肥料，优化钾肥生产工艺对保证农业发展和提高资源利用率至关重要。随着人工智能技术的深化应用，钾肥生产工艺也得到优化，人工智能通过分析和学习生产过程海量数据，准确优化工艺参数，智能调控生产流程和提前预警故障，以提高钾肥整体生产水平。当前，从盐湖卤水中提取钾肥是一条重要的钾肥生产线路，特别是对盐湖企业具有成本和环保两方面的优势。盐湖企业在提取钾元素时，首先需要利用盐湖的资源特性，通过多级盐田滩晒来实现卤水的自然浓缩^[1]。在此过程中，大多数的氯化钠、硫酸镁等杂质会随着水分的蒸发而逐渐结晶分离，最终得到以光卤石 ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) 为主的含钾原矿，后续纯化环节盐湖企业一般采用冷分解和浮选联合流程：首先利用光卤石各组分在水中溶解度不同而分解成氯化钾和氯化镁混合液；再通过添加特殊的捕收剂及起泡剂将溶液中氯化钾颗粒有选择地吸附于气泡表面，并进行浮选分离以除去残余杂质，最终生产出纯度合格且符合农业需要的钾肥产品，且全过程与盐湖企业资源禀赋相适应，能够实现盐湖卤

水提钾价值的最大化。

1 人工智能在钾肥生产工艺优化中运用的经济价值

1.1 提高了工艺参数调控的精准度

盐田日晒结晶过程预测：人工智能通过机器学习算法，基于气象数据（温度、风速、湿度、蒸发量）和历史生产数据，构建 ML 时序预测模型，精准预测光卤石结晶点和收率，指导卤水分离和收盐作业。以成矿卤水为例：模拟卤水波美度、卤温、离子组成、近期气象数据和成矿品位等因素之间的联系，构建预测模型，实现参数动态优化，以 25℃ 五元体系的介稳相图和实时监测数据为基础，该模型能在 72h 前预测出析盐的转折点，从而做到精准导卤，使资源回收率及矿石品质得以提升，与传统的人工判断相比，导卤误差减少约 15%^[2]。

1.2 实现生产流程的智能化监控

利用工业物联网 (IIoT) 和人工智能的结合技术，可以搭建一个涵盖“晒矿—选矿—产品”整个流程的智能化监控系统。通过部署传感器实时采集温度、浓度、流量、压力等 300 余项参数，经边缘计算节点预

处理后上传至 AI 平台，算法可识别异常工况（例如，分解槽矿浆温度突然降低，分解加水量升高，搅拌速率升高），在 15s 内触发预警并生成调整方案。对比人工监测、判断到给出处置方案，智能化监控系统几乎做到瞬时响应，在产线浮选工段试点引用的结果显示：生产的连续性得到明显增强，工序非预期停机时间较之前缩短了 50%。

1.3 资源利用和成本控制的优化

人工智能通过建立能耗 - 物耗 - 产量的关联模型来动态地配置资源。基于对浮选矿浆及尾液中钾离子浓度的监测，同时利用视觉传感器实时分析矿浆泡沫形态、大小、颜色，通过深度学习模型动态调整捕收剂、起泡剂用量，提高钾回收率和产品品位，并在确保产量不受影响的情况下，减少单位钾肥的用水量 15%；利用设备的振动和温度数据来训练预测性的维护模型，可以提前 1-2 周检查泵体、阀门等容易损坏的部件的隐患，从而使维修成本降低 30%，设备的平均无故障运行时间延长到 180 天以上，经过浮选工段试点应用，综合生产成本下降约 60 元/t，每年可节约成本数百万元。

1.4 提高了产品质量检测的效率和稳定性

将机器视觉与深度学习算法相结合，能够实现钾肥质量的在线检测。利用高清相机对产品图像进行拍摄，该算法能够迅速识别出颗粒的粒径（误差 $\leq 0.1\text{mm}$ ）、白度（精度 $\pm 1\%$ ）和颗粒杂质含量，检测速度可以达到 3000 粒/s，这比传统的人工抽检效率大幅提高。同时，系统可实时将检测结果反馈至结晶环节，自动调整加热、冷却及搅拌速率等参数，使产品纯度、粒径等指标合格率从 95% 提升至 99.5%，降低了由于质量问题造成返工的损失，年挽回经济损失数百万元左右。

2 人工智能在钾肥生产工艺优化中的运用方法与效果

2.1 机器学习对工艺参数进行优化

机器学习对钾肥生产的海量历史数据进行学习和分析，建立工艺参数和生产指标之间精准关联模型并动态优化参数，以卤水滩晒结晶工艺为例，收集不同批次的卤水成分（如 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度）、卤量、温度、蒸发量、析盐量和成矿品位等数据，通过随机森林，支持向量机和梯度提升算法训练，厘清各个参数对于钾盐析出率和成矿品位的影响权重^[3]。该模型能够实时地接收当前生产数据并迅速地对参数调整结果进行预测，如被监控批次卤水中 K^+ 浓度 $30\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ， Mg^{2+} 含量达到 $60\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ，液相温度波动范围 $23\text{--}28^\circ\text{C}$ 时，建议开展卤水固液分离，结合实时蒸发量调整进出卤

量以维持析钾阶段 K^+ 浓度在 $26\text{--}23\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 浮动以保证稳定产出含钾高且硫钾比适宜的钾混盐矿。同时该模型具有持续学习的能力，并通过持续融入新生产数据进行迭代更新以适应原料成分的波动和设备性能的改变，解决了传统工艺参数调整对人工经验的依赖性和滞后性。通过盐田试点模拟，各工艺参数的调控误差由原来的 ± 2 下降到 ± 0.3 范围内，矿石品质稳定，批次卤水成矿品位波动范围减小到 ± 0.5 以下，生产稳定性得到了明显提高。

2.2 深度学习建立生产动态模型

深度学习依靠多层神经网络拟合复杂非线性关系能力强的特点，能够构建钾肥生产全过程动态模型并准确描绘生产过程实时变化规律，在浮选与重结晶过程中，使用时间序列数据作为输入，拟定每 5 min 收集矿浆温度、液位、离子浓度、尾液浓度等数据，并通过长短期记忆网络（LSTM）来捕获这些参数之间的时序关系，动态模拟矿浆分解到浮选再到重结晶阶段的转化过程，人工智能模型可以在不同时间点对上矿组成，矿浆参数和浮选收率实时预测^[4]。同时，结合卷积神经网络（CNN）处理结晶器内的实时图像数据，识别晶体形态、粒径分布等特征，与动态模型输出结果交叉验证，进一步提高预测精度。在企业浮选工段试点实施此模型之后，利用视觉传感器实时分析矿浆泡沫形态、大小、颜色，通过强化学习（RL）算法不断探索浮选温度、浓度、pH 值等上百个参数的最优组合，反馈至深度学习模型动态调整分解用水量、捕收剂、起泡剂用量，提高钾回收率和产品品位的同时降低了物料消耗量。企业浮选工段试点应用结果显示：药剂使用量较原先降低 5%，用水量降低 7%，智能系统对生产过程微调频繁，人工操作难以做到。

2.3 智能算法对结晶条件进行优化

钾肥生产中结晶环节对产品质量和生产效率有直接的影响。为了实现结晶条件的精准调控，采用智能算法实现了工艺的多目标优化，结晶过程，温度梯度，溶液过饱和度，搅拌速度和停留时间是晶体长大的关键因素。为了实现这一目标，我们采用粒子群优化（PSO）、遗传算法和模拟退火算法等先进的智能算法，目标是找到“晶体粒径均匀性 $\geq 90\%$ 、钾盐纯度 $\geq 95\%$ 、结晶时间最短”的最佳参数组合，以硫酸钾结晶阶段为例，算法实时监控结晶器中 K^+ 浓度、 SO_4^{2-} 浓度、 Cl^- 浓度及 Mg^{2+} 浓度，自动将温度梯度控制在 $0.5\text{--}1^\circ\text{C/h}$ ，过饱和度维持在 $1.05\text{--}1.10$ ，搅拌速度设为 $30\text{--}45\text{r/min}$ 。硫酸钾石晶体的平均粒径由 0.15mm 增加到 0.33mm ，明显减小了随后的分离损耗。该算法具有动态调整的能力，当结晶器进料引发过饱和度突变时，

可在10s之内重新进行计算并输出新搅拌速率和升、降温方案以避免晶体聚团。在结晶工段试点智能操控后，产品合格率从88%飙升至95%，结晶所需时间也减少了15%，达到了质量和效率的双重提升。

2.4 知识图谱有助于工艺决策

该知识图谱将钾肥生产领域多源知识融合在一起，建立结构化知识体系并对工艺决策进行智能支撑。其核心是将生产工艺手册、专家经验、历史故障案例、实验数据（如不同温度下的析盐规律）等转化为“实体-关系”等。例如，不同温度下卤水的析盐规律转化为“实体-关系”网络，涉及原料特性、工艺指标、气象数据、设备参数、故障类型等主要内容。“卤水系统点耶涅克指数”→“对应卤温”→“卤水所处析盐阶段”→“需固液分离导卤”→“导卤量”→“设备启动数量”。当生产中出现异常情况，如调节池卤水点位处于析钾阶段超过2h，系统通过知识图谱快速检索关联信息，定位可能原因（如极端天气现象造成卤水温度骤降，导致卤水系统点所处相区改变），并推送历史解决方案，如“加大调节池进水量并降低出水量”，与此同时，知识图谱会随着新数据的不断更新而更新，包括最新的实验成果和生产经验，在新增的“5G+物联网监控下参数优选方案”盐田试点应用中，工艺故障的排查时间从原先的平均8h减少到不超过2h，输出决策准确、及时，这大大减少了由于决策错误引起的生产损失。

2.5 机器视觉实现产品质量在线检测

将机器视觉技术与深度学习算法相结合，搭建钾肥产品质量在线检测系统以达到产品外观、纯度和粒径的实时准确判断，在钾肥制造过程中的成品输出环节，产品图像是通过高速工业相机（帧率 ≥ 200 帧/s）进行连续捕捉，并将其同步传送到图像处理模块进行处理。采用卷积神经网络（CNN）对图像进行特征提取，识别晶体颗粒的形态（比如有无结块，有无异形颗粒等）、粒径分布（误差 $\leq 0.02\text{mm}$ ）及表面杂质。根据氯化钾和硫酸钾的不同制品种类，在该体系中内置差异化检测模型，将异常数据反馈至前序环节，辅助调整冷却速率、搅拌强度、结晶温度等参数。系统检测效率提升至每秒3000粒以上，检测精度达99.5%，且可连续24h运行，检测精度与检测强度均为人力所不能及。

2.6 人工智能+物联网全流程监控

在钾肥生产中，人工智能和物联网深度融合，提供全流程监控智能化解决方案，明显提高生产效率和质量稳定性。通过将物联网传感器布设于钾肥生产线关键节点上，对温度、压力、流量、液位和成分浓度

进行实时数据采集，建立了涵盖原料预处理、浮选、过滤、重结晶、分离提纯和干燥包装全过程的感知网络。大量数据经过边缘计算的初始处理之后被传送到人工智能的分析平台^[5]。该平台内建机器学习算法深入挖掘数据，构建了生产过程动态数学模型。系统对实时数据进行分析，可以预测生产参数变化趋势并提前发现异常。并通过对比历史数据和算法推导，可在数据偏离或故障发生前10min内精准预警，提醒操作人员调整工艺参数或对设备点检维修，以人工智能为核心的决策支持系统可以根据生产目标和实时工况对生产参数进行自动优化。在卤水盐田滩晒过程中，系统能够根据气候、温度等外部因素结合卤水的浓度和流量等生产相关数据，动态地调节进出卤水量，同时采用计算机视觉技术实现生产现场的智能监控，用摄像头拍摄设备的运行状态和人员的操作行为，确定设备的不正常震动，管道泄漏和人员的违规操作并及时报警纠正，质量管控中，人工智能系统实时分析收集到的产品质量数据，当检测到产品粒度和纯度指标与标准存在偏差时，即时回溯生产过程参数并准确定位问题环节。通过构建一个质量与工艺参数之间的关联模型，该系统能够自动提供参数调整的建议，从而协助操作人员迅速纠正误差。此外，结合人工智能和物联网技术的全流程监控系统还能实现生产数据的可视化展示，使得管理层能够通过大屏幕实时了解整个工厂的生产情况，达到科学决策和精细化管理的目的，促进钾肥生产朝着智能化和高效化发展。

3 结语

人工智能在钾肥生产工艺优化方面显示出极大的经济价值，能够有效解决传统工艺中的许多问题，促进生产效率和生产质量的提高。尽管尚存在一些亟待解决的瓶颈，但随着相关技术的不断发展和完善，这些问题将逐步得到解决，钾肥行业必能朝着智能化、高效化和精准化的方向迈进，为农业可持续发展奠定强有力的支持。

参考文献：

- [1] 赵杰. 高效环保型化肥生产工艺的研究与应用 [J]. 化肥设计, 2024, 62(03):18-21.
- [2] 赵宁, 张西亚. 过滤式离心机在钾肥生产中的应用 [J]. 盐科学与化工, 2024, 53(08):51-54.
- [3] 武娜, 周月, 王孝峰. 我国钾盐钾肥产业发展综述 [J]. 肥料与健康, 2024, 51(06):30-34.
- [4] 王石军. 国内外钾资源开发利用现状及未来发展趋势 [J]. 肥料与健康, 2024, 51(06):35-43.
- [5] 石涛. 基于人工智能优化钾肥生产工艺 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(10):29-31.