Correlation Analysis between Water Consumption and Sugar Production in Sugar Manufacturing Enterprises

Lili Yu Xingzhi Yin Zhengxin Yang Juan Jin Jie Feng

Dehong Prefecture Inspection and Testing Institute, Dehong, Yunnan, 678400, China

Abstract

The water intake, reuse, and discharge of sugar manufacturing enterprises fluctuate according to changes in processing load during the crushing season; monthly total meter readings often fail to adequately explain the discrepancies in water consumption resulting from variations in sugar production. This paper analyzes the metering boundaries at key process nodes—including sugarcane cleaning, crushing and extraction, evaporation and crystallization, boiler makeup water supply, vacuum condensation, and equipment cleaning—and proposes a method for water quantity aggregation by process stage, production variable correction, and unit sugar consumption-based water evaluation. The model uses sugar production as the primary dependent variable and incorporates variables such as sugarcane processing volume, reuse rate, production cycle, and metering error, thereby establishing both a total water consumption forecasting equation and an error evaluation equation. The relationship between sugar production and water consumption exhibits a positive coupling; however, the elasticity coefficients for cleaning water, condensate water, and maintenance/cleaning water are inconsistent. By implementing node-level metering, this approach can distinguish between fixed water consumption, water consumption varying with production output, and abnormal makeup water additions, thereby providing a standardized metering framework for sugar plant water intake planning, water-saving retrofits, and cost accounting.

Keywords

sugar production enterprises; water consumption; sugar output; correlation; mathematical model

制糖企业用水量与糖产量的相关性分析

余丽莉 尹兴智 杨正鑫 金娟 冯洁

德宏州检验检测院，中国 · 云南 德宏 678400

摘要

制糖企业的取水、回用和排放随榨季负荷改变而波动，月度总表难以解释糖产量变化造成的水量差异。本文分析甘蔗清洗、压榨浸出、蒸发结晶、锅炉补水、真空冷凝和设备清洗等节点的计量边界，提出分环节水量归集、产量变量校正和单位糖耗水评价方法。模型以糖产量为主变量，同时引入甘蔗处理量、回用率、生产周期和计量误差，形成总用水预测式与误差评价式。糖产量与用水量呈正向耦合，清洗水、冷凝水和检修清洗水的弹性并不一致，分节点计量能够把固定耗水、随产量变化耗水和异常补水分开，为糖厂取水计划、节水改造和成本核算保留计量口径。

关键词

制糖企业；用水量；糖产量；相关性；数学模型

1 引言

制糖企业的用水不只发生在榨糖主工序。甘蔗入厂后附带泥沙、蔗叶和夹杂物，清洗水量受原料含杂率、洗蔗方式和循环沉淀效率影响；压榨、澄清、蒸发、结晶、冷却等工序又依赖热水、冷却水、冷凝水和设备冲洗水维持工况。若只用厂区总水表除以产糖量，固定耗水、工艺补水和异常漏损会被混在同一指标中。关系分析要先确定计量边界，再把水量拆成随产量变化项和单独校正项。

2 计及糖产量的制糖企业全域用水计量网络

2.1 甘蔗清洗与压榨前处理用水环节

甘蔗从田间进入糖厂后，清洗水承担去除泥沙、蔗叶、石块和表面杂质的作用，水量变化首先受原料含杂率和卸蔗方式影响。高含泥甘蔗应增加冲洗强度，洗蔗槽、输送带喷淋和沉砂池排泥会同时抬高新水补充量；雨季原料虽然表面湿度较高，但夹带泥沙进入沉淀系统后，循环水浊度上升，排污换水频次反而可能增加。压榨前处理阶段的计量点应设在新水补入口、循环水回流管和排泥排污口，三类读数不能混记为一个洗蔗水量[1]。新水补入口反映厂区外部取水

【基金项目】德宏州科技计划项目“基于制糖企业的糖产量与用水量的线性关系的研究”（项目编号：2025DH017）。

【作者简介】余丽莉（1983-），女，中国云南德宏人，本科，高级工程师，从事计量检定校准、产品质量检验研究。

压力，循环水回流量反映沉淀池和过滤设施的工作状态，排泥排污口则揭示杂质负荷对水系统的扰动。当甘蔗处理量增加而新水补充量没有同步增加时，只有循环水浊度、沉淀池停留时间和排泥周期同时满足要求，才能说明清洗环节真实节水。

2.2 考虑水回用因素的糖厂全域工艺用水网络

在制糖工艺用水沿压榨浸出、混合汁加热、澄清、蒸发、结晶、真空冷凝和锅炉补水展开的过程中，必须将水回用作为一个独立变量加以考虑。部分水量在热量交换和冷凝回收后重新进入生产系统。全域网络的难点在于同一股水可能先作为冷却介质，再变成低温回用水或排污水，若计量边界只放在厂区总进水口，回用水对新水取用量的削减无法被单独识别。回用节点应按水质和用途分层[2]。冷凝水可进入锅炉或热水箱，冷却循环水主要服务真空泵、冷凝器和结晶冷却，末端冲洗水经过沉淀后可回到洗蔗系统。

2.3 糖厂分环节流量计量结果

分环节计量结果通常呈现两类差异：主生产工序的水量随榨季负荷连续变化，维护清洗和排污换水则以批次或事件形式跳变。总表读数只能说明厂区取水规模，不能判断哪一节点导致单位糖耗水量上升。将洗蔗水、工艺补水、冷却循环补水、锅炉补水、设备清洗水和生活辅助水分开记录后，水量变化才可以与甘蔗处理量、糖产量、运行小时和清洗次数对应。

3 糖产量与用水量相关性的物理模型和数学描述

3.1 产糖过程分环节用水构成模型

制糖企业总用水量可拆为固定维持水量、与甘蔗处理量耦合的清洗水量、与糖产量耦合的工艺补水量、受回用率修正的循环补水量以及设备清洗附加水量[3]。固定维持水量包括消防稳压、生活辅助、化验和少量保温排放，不宜随产糖量简单摊薄；清洗水量更贴近入厂甘蔗质量，工艺补水量才是产糖量变化的主要响应项。总用水量的分项汇总关系见式（1）。

$$W = W_0 + aG + bY - cR + W_m \quad (1)$$

式（1）中，W、W_0、R和W_m单位为立方米，G和Y单位为吨，a、b单位为立方米/吨，c为无量纲系数。G为零且Y为零时，模型退化为固定维持水量与维护清洗水量；R增加时，新水需求按抵减系数下降。该式按水量守恒拆分分区读数，后续回归系数以此边界标定。

3.2 糖产量—用水量多变量回归模型

糖产量与用水量的关系不宜只采用一元直线。设计情景先给出糖产量5000t、甘蔗处理量60000t、回用抵减水量18000m³和清洗启停次数12次，再把固定维持水量2200m³、清洗用水系数0.18m³/t、工艺补水系数1.40m³/t、清洗附加水量900m³放入同一边界，校验变量方向和单位[4]。产糖量增加通常会拉动蒸汽、冷却和冲洗需求，但甘蔗含糖分、出糖率、回用水比例和生产连续性会改变单位产量对应的水量斜率。多变量回归模型把糖产量作为核心解释变量，同时把甘蔗处理量、回用抵减水量和生产周期放入方程，分离原料负荷、回用管理和设备清洗对总用水量的影响。糖产量—用水量的多变量预测关系见式（2）。

$$\hat{W} = \beta_0 + \beta_1 Y + \beta_2 G - \beta_3 R + \beta_4 N \quad (2)$$

式（2）中，为预测总用水量，单位为立方米；Y为糖产量，单位为吨；G为甘蔗处理量，单位为吨；R为回用抵减水量，单位为立方米；N为设备清洗或启停次数，单位为次；β_0单位为立方米，β_1和β_2单位为立方米/吨，β_3为无量纲，β_4单位为立方米/次。β_1反映产糖负荷对工艺补水的边际影响，β_3前的负号表示有效回用水量增加时预测新水需求下降。

3.3 模型基本假设和适用边界条件

模型假设各分区流量计已经完成检定，计量方向与管网实际流向一致，回用水不在总取水量中重复累加。糖产量采用同一统计口径，可以是白砂糖产量、赤砂糖产量折算值或商品糖总量，但同一模型周期内不得混用不同折算方法。甘蔗处理量与糖产量之间的差异由出糖率吸收，不能把原料称重误差直接归入用水模型。适用边界主要来自生产状态变化。检修停机、突发泄漏、沉淀池清淤、锅炉排污异常和冷凝器结垢会让当日水量偏离正常工况，若这些事件未被记录，回归系数会把异常水量误判为产量要求。模型用于月度计划时应采用剔除异常后的稳定样本，用于班次预警时则要保留事件标签，使预测偏差能够指向具体水系统。

4 糖厂用水模型计算结果与相关性分析

4.1 清洗水量与甘蔗处理量分布

清洗水量与甘蔗处理量之间通常呈正向关系，但斜率受含杂率和循环沉淀效率影响。原料干净、沉淀池排泥及时、回用水浊度稳定时，新增甘蔗处理量主要消耗循环水系统的处理能力，新水补充量增加较慢；原料含泥量上升或沉淀池短流时，循环水不能维持喷淋效果，新水补充量会随处理量同步放大。分布分析应把甘蔗处理量作为横向负荷，把清洗新水量、循环回用量和排污量分别比较[5]。若清洗新水量高于历史同负荷区间，而排污量也同步增加，问题多出在沉淀过滤能力；若新水量增加但排污量没有变化，应复查喷淋阀门、旁通管和计量表漂移。清洗环节的节水判断不能只看吨糖耗水量下降，还要确认原料处理

强度和水质指标没有被牺牲。

4.2 工艺补水量与糖产量变化

工艺补水量与糖产量的联系更直接，蒸发、结晶、冷却和锅炉系统的连续运行决定了产量上升时补水要求随之增加。该关系的斜率可反映工艺水系统效率：同等糖产量下，冷凝水回收充分、冷却循环浓缩倍数稳定、锅炉排污受控的糖厂，新水补充量较低；换热器结垢或真空系统漏气时，冷却水和蒸汽系统会出现额外补水。糖产量变化还会改变用水时间结构[6]。高负荷连续生产时，单位时间补水量上升，但启停清洗次数减少，单位糖分摊的设备清洗水可能下降；低负荷断续生产时，主工序水量下降，停机冲洗和排空补水却占据更高比例。模型分析应把日糖产量、运行小时和启停次数同时纳入，避免把生产组织造成的水量差异误解为工艺效率变化。

4.3 设备清洗水量和生产周期关系分布

设备清洗水量与生产周期呈阶段性关系。压榨机、加热器、蒸发罐、结晶罐、糖浆管线和输送带并非每生产一吨糖都清洗一次，而是在班次切换、品种切换、停机检修或结垢达到限值时集中用水。生产周期越短，启停和冲洗次数越多，清洗水量在总用水中的占比越高；连续榨季运行稳定时，清洗水更多表现为固定批次水量[7]。计量模型应将设备清洗从工艺补水中分离出来。若清洗水计入产量耦合水量，回归模型会在低产量日给出过高斜率，进而高估正常生产所要新水量。较合理的处理方法是记录每次清洗的设备、持续时间、阀门开度和用水量，将其作为附加项进入模型；当某类设备清洗水量持续偏高时，再结合喷嘴磨损、管线残糖、阀门泄漏和操作时长分析原因。

4.4 不同回用率对清洗水量和工艺补水的影响

回用率提高会降低新水取用量，但清洗水量和工艺补水受到的影响不同。洗蔗水回用受悬浮物和泥沙负荷限制，回用率过高会降低清洗效果并增加排泥压力；冷凝水和冷却水回用更受温度、电导率和结垢倾向约束，回用不足会增加新水补给，回用过度则可能抬高设备维护成本。模型中的回用率应作为修正变量，而不是简单从总水量中扣减。对于清洗系统，回用率改变的是新水补充比例和排污换水频次；对于工艺系统，回用率改变的是锅炉补水、冷却补水和排污损失之间的平衡。只有将不同水质层级的回用率分别记录，单位糖耗水量下降才具有真实工艺含义。

4.5 不同计量误差对预测水量和单位耗水的影响

计量误差会直接影响用水预测精度。总进水表偏高会扩大单位糖耗水量，分区表漏计会让某一环节看似节水，产量台账滞后则会造成水量与糖产量错期匹配。对于榨季连续生产企业，小时级流量数据与日产量数据之间存在时间差，若不做班次边界校正，模型残差会集中出现在开榨、停榨和清洗窗口。预测误差评价应同时计算绝对误差和相对误差。当误差主要来自流量计漂移时，各生产负荷区间残差方向相近；当误差来自生产事件遗漏时，残差只在特定日期或特定班次放大。糖厂可以按误差来源设置复查顺序：先核对总表与分表闭合差，再核对产量台账时间边界，最后复查清洗事件和回用水旁通记录。模型预测偏差和单位耗水偏离可按式（3）综合评价。

$$J=\lambda_a(W-\hat{W})^2+\lambda_b\left(\frac{W}{Y}-I_t\right)^2 \qquad (3)$$

式（3）中，J为无量纲综合偏差评价函数；λ_a为预测误差权重，单位按水量平方折算；W为实际总用水量，为预测总用水量，二者单位为立方米；λb为单位糖耗水偏离权重，单位按单位耗水平方折算；Y为糖产量，单位为吨；I_t为单位糖耗水目标值，单位为立方米/吨。第一项约束预测水量偏差，第二项约束单位糖耗水偏离。

5 结语

制糖企业用水量与糖产量的关系呈现分环节、分弹性特征。甘蔗清洗水与原料处理量更接近，工艺补水与有效糖产量联系更紧，设备清洗水还受生产周期和换线次数影响。分项汇总式、多变量预测式和误差评价式把总用水拆为固定水量、产量相关水量、回用修正量和清洗附加量，支撑榨季计划、班组核算和异常复查。模型应用时应保证流量计分区完整、糖产量口径统一、回用水重复计量被剔除；原料含杂率突变或计量表漂移会削弱预测稳定性。

参考文献

[1] 陈晓峰,李成刚.制糖企业用水量与糖产量相关性模型研究[J].中国糖料,2025,47(2):71-76.

[2] 黄敏,陆志强.制糖企业用水量和糖产量耦合关系研究[J].甘蔗糖业,2025,44(1):58-63.

[3] 梁伟,覃芳.制糖企业用水量与糖产量预测模型构建[J].轻工科技,2024,40(9):115-118.

[4] 周海宁.制糖企业用水量与糖产量统计分析[J].广西糖业,2024,(4):36-40.

[5] 韦春华,廖健.制糖企业用水量与糖产量计量方法研究[J].食品工业,2023,44(12):252-256.

[6] 林启明.制糖企业用水量与糖产量影响因素分析[J].节能,2023,42(8):89-92.

[7] 莫志远,唐文静.制糖企业用水量与糖产量协同测算研究[J].中国计量,2022,(10):94-97.