

深度学习驱动的污水处理厂出水水质预测与工艺优化

程果

湖北省工程咨询股份有限公司，湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ME.2025050009

摘要：伴随城市化不断推进以及工业废水排放数量的攀升，污水处理厂遭遇了提高出水水质以及运行效率这两重难题。以往的水质预测手段在应对繁杂的非线性数据时，存在精准度欠佳、及时性不够等状况，难以契合现代污水处理精细化的要求。深度学习作为一种高效率的数据处理手段，能够自行探寻数据里的复杂特性以及潜藏规律，给污水处理厂出水水质的预测及工艺的优化提供了全新的解决办法。本文就深度学习在污水处理这一领域的运用展开研究，首先剖析它在提升预测精准程度、探寻工艺内在联系、优化资源分配以及强化水质安全等方面的关键价值；紧接着探究深度学习目前在污水处理厂当中的应用实际情况，涵盖数据驱动的建模、多源数据的融合、实时的优化管控以及与传统工艺相结合的情形；最后从模型架构、数据管理、控制算法以及人机协作等多个方面提出具有针对性的优化举措，目的在于为污水处理厂达成智能化的升级以及可持续发展给予理论层面的支撑与实践方面的参考。

关键词：深度学习；污水处理厂；出水水质预测

Deep Learning-Driven Prediction of Effluent Quality and Process Optimization in Wastewater Treatment Plants

Cheng Guo

Hubei Engineering Consulting Co., LTD, Wuhan, Hubei 430000

Abstract : With the continuous advancement of urbanization and the increasing volume of industrial wastewater discharge, sewage treatment plants have encountered two major challenges: improving the effluent quality and operational efficiency. Previous water quality prediction methods had problems such as poor accuracy and insufficient timeliness when dealing with complex nonlinear data, making it difficult to meet the refined requirements of modern sewage treatment. Deep learning, as an efficient data processing method, can independently explore the complex characteristics and hidden patterns in data, providing a brand-new solution for the prediction of effluent quality and the optimization of processes in sewage treatment plants. This article conducts research on the application of deep learning in the field of wastewater treatment. Firstly, it analyzes its key values in enhancing the accuracy of prediction, exploring the intrinsic connections of processes, optimizing resource allocation, and strengthening water quality safety. Next, explore the current practical application of deep learning in sewage treatment plants, covering data-driven modeling, fusion of multi-source data, real-time optimization and control, as well as the combination with traditional processes. Finally, targeted optimization measures are proposed from multiple aspects such as model architecture, data management, control algorithms, and human-machine collaboration, with the aim of providing theoretical support and practical references for the intelligent upgrade and sustainable development of sewage treatment plants.

Keywords : deep learning; wastewater treatment plant; effluent water quality prediction

引言

污水处理作为确保水资源循环利用以及生态环境安全的关键部分，其出水水质稳定达标这件事，和受纳水体的环境质量以及人类健康是紧密相连的。由于水质标准持续提升，污水处理工艺也愈发繁杂，所以，精确预估出水水质并且依据这一预估来优化工艺参数，就成为提高污水处理厂运行效果的核心要点。以往传统的水质预测手段，像回归分析、时间序列模型等，要依靠人工去设定特征，并且只建立简单的数学关系，很难去抓住污水处理过程里众多变量所具备的非线性、时变性以及耦合性这些特点。而深度学习因为具备强大的非线性拟合能力，还有自动提取特征的优势，能够从海量的历史数据当中学习到复杂的模式及规律，这就为精确预测出水水质、优化工艺运行提供了强有力的支持。对深度学习在污水处理厂出水水质预测与工艺优化方面展开研究，是具备重要的理论意义和实际应用价值的。

作者简介：程果（1993.10-），女，河南南阳人，硕士，工程师，研究方向：给排水、环保节能。

一、深度学习在污水处理厂出水水质预测与工艺优化中的核心价值

(一) 提升水质预测精度与实时性

污水处理流程包含着大量物理、化学以及生物方面的反应。像化学需氧量 (COD)、氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)、总磷 (TP) 这类水质指标的变动，会被进水水质、水量、温度、溶解氧 (DO) 等多种要素综合作用，呈现出很强的非线性及变性特点。深度学习模型之中，循环神经网络 (RNN)、长短时记忆网络 (LSTM) 等，它们可以凭借多层神经元的相互连接以及权重的调整，自动地去学习数据里的时间序列特征和长时段依赖关系。就比如说，LSTM 网络能对长时间序列数据有效处理，捕捉到水质指标在不同时间规模上的变化规则，进而对未来的出水水质展开精准预估。和传统模型对比而言，深度学习模型在处理复杂数据时，具备更高的预测准确性，能够给污水处理厂的运营管理给出更可靠的支撑。而且呢，深度学习模型可以实现实时数据的输入跟输出，搭配在线监测体系，能够实时追踪水质的变化走向，及时察觉到异常状况并且发出警报，为污水处理厂的实时调控给予助力。这种实时预测能力，能让操作人员快速做出回应，对工艺参数进行调整，防止出现水质超标以及运行事故。

(二) 挖掘复杂工艺关联关系

污水处理工艺涵盖众多处理单元，像格栅、沉砂池、生化池、二沉池等。各个单元彼此之间，运行参数和水质指标存在着相互关联与相互作用的关系。以往采用的办法，很难全方位地揭示这些复杂关系，使得工艺的优化缺少系统性和针对性。深度学习凭借对大量以往运行数据的学习，能够挖掘出不同工艺参数和出水水质之间潜藏的联系，以及各处理单元相互间的协同作用原理。比如说，在生化处理阶段，进水负荷、污泥浓度、DO 含量等参数，与 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除成效紧密相关，深度学习模型能够辨别出这些参数之间的非线性关系，进而确定最适宜的运行参数组合。另外，深度学习还能够发现某些传统办法不易察觉的因素对水质产生的影响，例如微生物群落结构的变动、水温的微小波动等，这就为深层次理解污水处理过程的内在机制，提供了全新的视角。依据这些挖掘出的关联关系，污水处理厂可以制定更为科学合理的工艺优化方案，达成从依靠经验驱动向依靠数据驱动的决策转变，提升工艺运行的稳定性与效率。

(三) 优化资源配置与运行成本

污水处理厂开展运作时，往往要耗费诸多如能源、药剂以及人力之类的资源。而对资源予以合理配置，实乃达成降低运行成本这一目标的核心要点。深度学习凭借对出水水质的精准预估以及对工艺运行状况的实时监测，能够为资源的优化配置提供相应依据^[1]。就能源消耗层面而言，生化池的曝气系统属于污水处理厂内的主要耗能设备之一，该设备的运行功率和 DO 含量之间存在紧密关联。深度学习模型能够依据水质预测的结果以及当下的运

行状态，自动对曝气强度作出调整，从而在确保处理效果的基础上，最大程度地削减能源消耗。从药剂投加的角度来讲，借助对进水水质和处理目标展开分析，^[2]深度学习能够确定最为适宜的药剂投加量，如此便能够防止因药剂浪费或者过度投加而给环境带来二次污染。

二、深度学习在污水处理厂的应用现状分析

(一) 数据驱动建模的技术演进

早期关于污水处理的数据驱动建模工作，大多是以传统统计学习手段为依托，像多元线性回归以及支持向量机 (SVM) 之类的方法。在应对简单线性数据或者低维度数据的情形下，这些方法能展现出一定程度的成效。不过，一旦面临复杂的污水处理过程所产生的数据，其构建模型的能力就会遭遇局限。伴随着深度学习技术逐步发展，越来越多的研究人员开始把卷积神经网络 (CNN)、循环神经网络 (RNN) 以及长短时记忆网络 (LSTM) 等模型运用到污水处理这一领域。其中，CNN 能够从数据当中提炼出空间特征，比较适合用来处理与图像或者空间分布有联系的数据，比如对污水处理厂设备的监控图像加以分析，从而辨别设备的运行状况。而 RNN 和 LSTM 在处理时间序列数据方面有着突出表现，能够掌握水质指标随着时间推移而变化的规律，^[3]所以在出水水质预测环节得到了广泛运用。最近一些年，Transformer 模型在污水处理数据建模方面也开始初现端倪。它所具备的自注意力机制，可以切实有效地捕捉到数据中存在的长距离依赖关系，进一步提高了模型的预测精准度。这些深度学习模型处于持续发展演变之中，为污水处理厂进行数据驱动建模提供了更为强劲有力的工具，有力地促使该领域从运用简单模型朝着运用复杂模型的方向转变。

(二) 多源数据融合的实践探索

污水处理厂在运转期间所产生的数据呈现出多源头、不一样结构以及数量庞大等特性，涵盖水质监测方面的数据、设备运转的数据、环境参数相关的数据等等。单一种类的数据通常没办法全方位展现污水处理流程的实际情形，所以，多种来源数据的融合就变成了提高模型性能以及工艺优化成效的关键办法。^[4]在实际操作当中，研究人员尝试把不同来源的数据加以整合。举例来讲，把在线监测得到的水质数据跟实验室分析的数据结合在一起，让数据的准确度与完整性得到提升；把设备的传感器数据和工艺运行参数数据相融合，深入探究设备运行状态对水质产生的影响。除此之外，还能够融合外部环境数据，像是天气数据、水文数据等，把外部因素对污水处理流程的影响考虑进去。多种来源数据的融合不仅要解决数据格式转变、时间同步等技术层面的问题，而且还得设计恰当的融合策略，比方说早期融合、晚期融合或者中间融合等，从而充分发挥不同数据具备的优势。通过多种来源数据的融合，深度学习模型能够获取更为丰富的输入信

息，增强对污水处理流程的理解能力与建模能力，为精准预测以及优化给予更为有力的支撑。^[5]

(三) 实时优化控制的系统构建

以基于深度学习而得出的出水水质预测成果为基础，构建实时优化控制系统，此乃达成污水处理厂智能化运作的重要步骤。实时优化控制系统一般涵盖数据采集单元、模型预测单元、优化决策单元以及执行控制单元。数据采集单元主要负责及时获取污水处理流程里的各类数据，并将这些数据传递至模型预测单元；模型预测单元借助深度学习模型来预估出水水质；优化决策单元依据预测的结果以及预先设定的优化目的，比如降低能源损耗、提升水质达标比率等，制定出最佳的工艺参数调整方案；执行控制单元把这个调整方案传达到现场的设备，从而实现对污水处理工艺的实时操控。在实际运用当中，实时优化控制系统需要拥有较高的可靠性、较快的响应速度以及较强的抗干扰能力，以此确保在繁杂的工业环境下稳定运行。比如说，在曝气控制方面，实时优化控制系统能够依据 LSTM 模型对 DO 浓度以及出水水质的预测情况，自动调节曝气风机的频率，让 DO 浓度维持在最佳区间内，这样既保障了微生物的活性，又减少了能源的消耗。通过搭建实时优化控制系统，污水处理厂得以实现从预测到决策再到控制的闭环式管理，提升工艺运行的自动化与智能化程度。

三、基于深度学习的污水处理厂工艺优化策略

(一) 模型架构优化

为促使深度学习模型于污水处理数据处置环节的效能得以提升，须依据污水处理流程的特性，对模型架构加以优化。针对时间序列数据的预估难题，能够运用混合模型架构，将长短期记忆（LSTM）网络与卷积神经网络（CNN）相融合，充分施展 LSTM 在处理时间序列以及 CNN 在提取空间特征方面的长处。举例而言，在处置水质监测数据时，CNN 可针对数据的空间分布特性进行提取，诸如不同监测点之间的关联等，而后把所提取的特性输入至 LSTM 网络，开展时间序列的预估，以此提高模型对于复杂数据的处置能力。除此之外，还可引入注意力机制，使模型在处理数据期间，更为关注关键的时间节点与特性，提升模型的预估精准度。针对多输出预估问题，像同时预估化学需氧量（COD）、氨氮（NH₃-N）、总磷（TP）等多个水质指标的情况，可设计多任务学习模型，共用底层的特征提取层级，针对不同的水质指标设定独立的输出层级，达成多个指标的联合预估，提高模型的效率与泛化能力。在模型训练进程中，还需合理挑选损失函数与优化算法，按照实际的预估需求与数据特性予以调整，保障模型能够收敛至最优解。

(二) 数据治理强化

深度学习模型得以成功应用，离不开高质量的数据做支撑，所以必须强化污水处理厂的数据管理工作。首先来讲，要让数据

采集体系更加完备。于污水处理厂的各个关键点位，安装高精度的感应器，务必要能够及时且精确地收集到进水的水质、水量，还有设备运行的参数、环境参数等各类数据。与此同时，搭建数据校准及验证机制，对收集来的数据实施预处理。像是消除数据中的干扰因素、补齐缺少的数据值、修正异常的数据，以此提升数据质量与可信度。其次，应当构建统一的数据管控平台，对多种来源、不同形式的数据加以整合和存储，达成数据的集中管控与分享。借助数据清理、数据转换、数据集成等技术手段，把不同格式、不同出处的数据转变成统一的标准格式，为后续的数据解析以及模型训练提供便利。另外，还得建立数据安全防护机制，防范数据出现泄露以及被篡改的情况，切实保障数据的安全以及完整。通过加强数据治理工作，为深度学习模型提供丰富且高质量的数据保障，提升模型训练成效以及应用价值。

(三) 控制算法创新

以往的污水处理控制算法，大多依据固定不变的控制方式以及凭借经验得出的参数来运作。这种方式在面对复杂且变化无常的运行环境时，往往显得力不从心。通过借助深度学习所具备的优势，推进控制算法的革新，这是达成工艺优化的关键手段。可以把深度学习模型和模型预测控制（MPC）融合在一起，从而构建出基于模型的预测控制算法。模型预测控制（MPC）以未来某段时间内的预测输出作为依据，运用滚动优化的方法，计算得出最为适宜的控制序列。这样一来，就能够有效地应对约束条件以及多目标优化方面的问题。而深度学习模型则为模型预测控制（MPC）提供精准的预测模型，增强控制算法的适应能力以及鲁棒特性。比如说，在污水处理中的曝气控制环节，借助深度学习模型对溶解氧（DO）浓度以及出水水质的变化走向进行预测，模型预测控制（MPC）依照预测结果以及预先设定好的优化目标，像是将能耗降至最低并且确保水质符合标准等，算出最为理想的曝气风机控制参数，进而实现对曝气系统的动态优化管控。

(四) 人机协同机制构建

在污水处理厂实施运行管理工作期间，人员所具备的经验以及做出的决策依旧占据关键地位。鉴于此情形，就必须搭建起人机协同的相关机制，充分把操作人员与深度学习系统各自所拥有的优势给展现出来。从一方面来讲，深度学习系统能够向操作人员供给水质实时预测的成果、工艺优化给出的提议以及设备故障预警的警告等诸多信息，以此助力操作人员做出相关决策；从另一方面来说，操作人员可将自身积累的经验以及专业知识录入到系统当中，针对模型所预测的结果以及优化方案展开验证与调整，以此提升系统的可靠程度与实用性能。例如，当深度学习模型给出调整某一项工艺参数的建议后，操作人员可依据实际运行过程中的经验以及现场的具体状况，对建议是否合理进行判断，进而决定是不是要去执行。与此同时，操作人员还能够透过人机交互的界面，针对系统的参数与模型实施调整与优化，使得该系统更好地和污水处理厂实际运行情况相契合。

四、结语

深度学习作为一项具备强大数据处理能力的技术手段，为污水处理厂的出水水质预测以及工艺优化带来了全新的思路与方式。本文自核心意义、应用现实状况以及优化举措这三个层面，对深度学习于该领域的运用展开了深入探究。研究成果显示，深度学习可以切实有效地提高水质预测的精准程度，挖掘出工艺之间的关联联系，对资源配置加以优化，并增强水质安全的保障力度，在污水处理厂朝着智能化方向升级的进程中，有着至关重要的应用价值。深度学习在污水处理厂的应用已然取得了一定程度

的进步，不过也遭遇了数据治理、模型可解释性以及与传统工艺融合等方面的难题。借助优化模型架构、加强数据治理、创新控制算法以及构建人机协同机制等策略，能够进一步提升深度学习在污水处理厂中的应用成效，推动污水处理行业朝着高效、智能且可持续的方向迈进。展望未来，鉴于深度学习技术的持续发展以及污水处理需求的不断改变，需要持续进行相关研究工作，不断探寻新的应用模式与优化办法，以便为解决水资源环境问题贡献更为显著的力量。

参考文献

-
- [1] 吴婧. 基于 SSAG-ALSTM 的污水处理厂出水水质预测研究 [D]. 武汉轻工大学, 2024.
 - [2] 窦慧芸. 基于 LSTM 的污水处理厂出水水质的预测研究 [D]. 江苏 : 江苏大学, 2024.
 - [3] 李亮亮. 城镇污水处理厂出水水质提升技术研究 [J]. 山西水利科技, 2024(4):48–50, 66. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8139.2024.04.016.
 - [4] 索伟, 方勇, 邢峰杰. 浅谈污水处理厂出水对白浪河断面水质影响情况 [J]. 山东化工, 2024, 53(18):279–281. DOI: 10.3969/j.issn.1008-021X.2024.18.072.
 - [5] 彭定华, 张辉, 马雪菲, 等. 基于减污降碳和水质目标约束下的黄河干流兰州段城区污水处理厂出水排放限值研究 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(1):202–211. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.10.15.