

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.15.004

基于透明度的分散式污水设备处理效果快速检验技术

陈泊明, 何星阳, 魏斌, 汪诚文
(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 目前我国对于分散式生活污水处理设备的效果评价主要采用人工抽检法, 成本高, 效率低, 且时效性不佳。针对该现状, 提出了一种基于透明度的分散式污水设备处理效果快速检验技术。首先验证了生活污水透明度与其他主要水质指标间存在明显的相关关系, 其次开发并验证了基于计算机视觉的透明度检测算法, 然后完成了硬件开发与验证。该技术能够低成本、高效、自动化检测处理后生活污水的透明度, 从而反映设备处理效果, 符合分散式污水设备特点。

关键词: 分散式污水处理设备; 处理效果评价; 透明度; 快速检测

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)15-0023-05

Transparency-based Rapid Testing Technology for Treatment Effect of Decentralized Domestic Sewage Equipment

CHEN Bo-ming, HE Xing-yang, WEI Bin, WANG Cheng-wen
(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: At present, China's evaluation of the treatment effect of decentralized domestic sewage equipment mainly adopts the manual sampling method, which is costly, inefficient and time-sensitive. Based on this status quo, a transparency-based decentralized sewage equipment treatment effect rapid testing technology was proposed. Firstly, the transparency of domestic sewage was verified to have an obvious correlation with other major water quality indicators; Secondly, the transparency detection algorithm based on computer vision was developed and validated; Finally, the hardware development and validation was completed. The technology can detect the transparency of treated domestic sewage at low cost, high efficiency, and automation, thereby reflecting the treatment effect of the equipment, which is in line with the characteristics of decentralized sewage equipment.

Key words: decentralized domestic sewage equipment; evaluation of the treatment effect; transparency; rapid testing

目前, 我国的农村污水处理设施建设取得了显著成效, 但对于农村污水处理设施的效果检验仍沿用城市污水处理厂的思路, 采用对出水进行定时抽检、人工采样、检测主要污染物浓度的方法^[1]。显然, 此种方法需要耗费大量的人力和物力, 且结果

存在较大的滞后性, 在农村分散式场景下并不适用, 亟需开发一种适合农村分散式场景的自动化、低成本的污水处理设备效果快速检验技术。

因此, 笔者结合农村污水特点, 以透明度作为主要检测指标, 首先验证了生活污水透明度与其主

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1601003)

通信作者: 汪诚文 E-mail: wangcw@tsinghua.edu.cn

要水质指标的关系,确定了使用透明度值来反映农村生活污水处理设备处理效果的可行性。其次,开发了基于计算机视觉的水样透明度快速检测算法,确保能够在拍照条件稳定的情况下,仅需通过一张水样图片即可较为准确地检测水样的透明度值。然后,根据基于计算机视觉的水样透明度快速检测算法的拍照要求设计了水样透明度拍照检测盒,能够在不同的外部条件下为透明度检测算法提供稳定的拍照采样条件,确保实际使用中的检测稳定性。本研究从指标选取出发,包含了水质相关性验证、检测算法开发与验证、检测盒开发与验证等全流程,完成了基于透明度的分散式污水设备处理效果快速检验技术,能够自动化、低成本、快速地对污水处理设施的出水进行检验,填补了我国在适用于农村分散式污水处理条件下的效果评价方法的空白,大大提高了我国农村污水处理工作的监管效率,可为农村排水系统的完善与建设提供参考。

1 生活污水透明度与其他水质指标的关系

1.1 水样透明度

透明度表示水样清澈的程度,它能反映水质情况,也是景观水体治理中关注的重要指标之一^[2],主要使用透明度计或塞克盘法通过目视进行检测^[3]。透明度在多个国家或地区的水体相关标准中作为主要管制指标出现(见表1),因此用透明度值表征水样的整体水质情况是合理的。

表1 不同国家对于水体透明度的管制情况

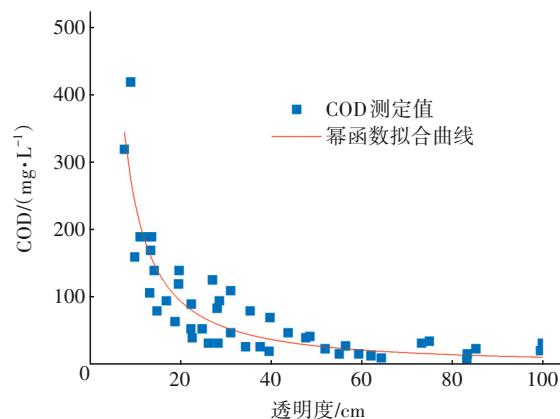
Tab.1 Regulation of water transparency in different countries

国家	水体	具体指标
中国	景观娱乐用水	透明度 ≥ 1.2 m为A类或B类,透明度 ≥ 0.5 m为C类
中国	城市黑臭水体	透明度 $=25\sim 10$ cm为轻度黑臭,透明度 < 10 cm为重度黑臭
中国	印染用水	透明度 ≥ 30 cm ^[4]
瑞士	排放污水	排放污水透明度 ≥ 30 cm ^[5-6]
日本	净化槽放流水	透明度 ≥ 20 cm ^[7]

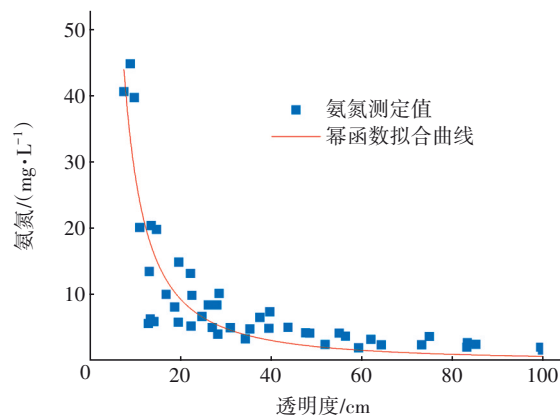
1.2 生活污水透明度与其主要水质指标的关系

陈一飞^[4-6]发现染整废水的透明度与其SS、色度存在显著相关关系,杨琨^[7]对日本某类型净化槽不同区域的水样进行检测分析,发现水样透明度与其BOD、浊度、SS等指标存在显著相关关系,并且分析了在净化槽处理过程中污水透明度的变化。

为探究生活污水场景下透明度作为水质整体衡量指标的可靠性,确定在农村污水处理设施的处理效果评价中应该采取的透明度阈值,收集了我国多个地区的实际生活污水:北京市某实验室生活污水、北京市生活污水、嘉兴市农村生活污水、宜兴市农村生活污水、上饶市生活污水、毕节市生活污水(分别取样6、4、5、4、7、7次),对其透明度、COD、氨氮、总氮、总磷、SS、VSS、pH、浊度、色度(PT-Co)等主要水质指标进行了检测,以COD和氨氮为例,不同透明度下的水质指标测定结果如图1所示。



a. 水样COD与透明度的关系



b. 水样氨氮与透明度的关系

图1 生活污水透明度与COD和氨氮浓度的关系

Fig.1 Relationship between domestic wastewater transparency and its COD and ammonia nitrogen

除pH外大部分水质指标与水样透明度呈现较为明显的相关关系,且均呈现近似于幂函数的分布,整体情况与陈一飞^[4-6]、杨琨^[7]的研究结论一致。表2展示了根据拟合曲线得到的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准值所对应的水样透明度。可以看到除总磷外,其余指标均在透明度 >40 cm时即可达到一级A标准,与表

1 中列举的不同国家对各种水体透明度的管控情况匹配。说明在生活污水条件下,透明度与主要水质指标呈现较为明显的相关关系,能够作为评价生活污水处理设施处理效果的综合指标,且根据实际数据,建议将出水透明度大于 30~40 cm 的污水处理设施评价为处理效果合格,反之则为不合格。

表 2 GB 18918—2002 一级 A 标准值与对应水样透明度值
Tab.2 Standard values of the GB 18918—2002 and their corresponding transparency values

水质指标	一级 A 标准值/(mg·L ⁻¹)	对应透明度/cm
COD	50	≈ 30
氨氮	5	≈ 40
总氮	15	≈ 15
总磷	0.5	≈ 90
SS	10	≈ 30

2 基于计算机视觉的透明度快速检测算法

2.1 图片采集

根据国标规定的水样透明度检测铅字法的原理,模仿人眼目视查看水样透明度。为排除其他因素干扰,在固定摄像头焦距、光照强度、穿透水样厚度、标定底板等条件下对待测水样进行拍照,以确保拍摄图片质量只受水样透明度影响,图片采集见图 2,采集到的不同透明度水样图片如图 3 所示。

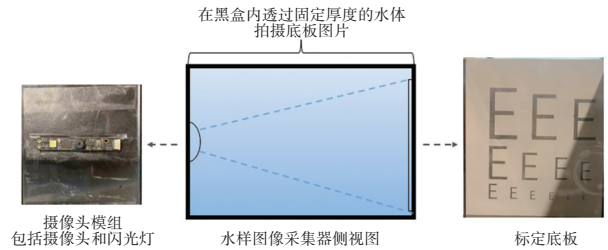


图 2 水样透明度检测图片采集示意

Fig.2 Schematic diagram of picture collection for water transparency testing



a. 透明度为 78.2 cm b. 透明度为 32.1 cm c. 透明度为 17.0 cm

图 3 采集到的不同透明度水样图片

Fig.3 Pictures of water samples collected with different transparency

2.2 透明度检测原理

从透明度的测量原理可知,水样透明度的不同可以反映到透过其拍摄的照片的成像质量上,即在

穿过水样厚度相同的情况下,透明度越高的水样,拍摄到的图像越清晰,图像质量越高。

BRISQUE 算法^[8]是一种无参考的空间域图像质量评估算法,其基本思想为基于空间域的变换,使用 MSCN 系数的 NSS 模型来量化图像由于失真而造成的“自然度”损失。区别于其他有参考的图像质量评估方法,BRISQUE 算法所使用的基本特征来自于 NSS 模型局部归一化亮度系数,不需要转换到另一个坐标系。本研究属于自然场景单图质量评估,使用 BRISQUE 算法能够稳定有效地得出统一的图片质量评估得分,从而能够在不同场景下检测水样的透明度。BRISQUE 算法的原理是从图像中提取 MSCN 系数,并将其拟合合成非对称性广义高斯分布(AGGD),提取拟合的高斯分布特征,输入到支持向量机(SVM)中做回归,从而得到图像质量的评估结果。

通过前期实验对大量实际水样(实际生活污水+配水)进行透明度检测与固定条件拍照采样发现,在固定拍照条件下,水样图像的 BRISQUE 质量得分与水样透明度存在明显的相关关系,拟合曲线如图 4 所示。拟合的 R^2 为 0.87,拟合数据的绝对平均误差(MAE)为 4.049,本算法量程为 15~100 cm,在算法量程下的误差百分比为 4.76%,建立的由照片 BRISQUE 质量得分计算水样透明度的关系式能够满足工程使用需要。

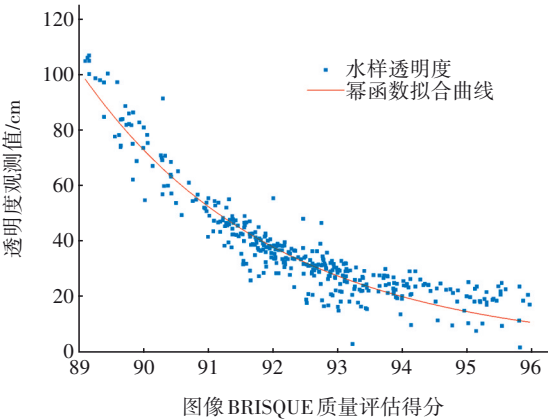


图 4 水样透明度与其照片 BRISQUE 质量得分的拟合曲线
Fig.4 Fitting curve between water sample transparency and its photographic BRISQUE quality score

2.3 透明度检验结果与统计学验证

为验证方法准确性,拍摄了 100 组在量程范围内不同透明度的水样图片作为验证数据,结果如图 5 所示。100 组样品的透明度值平均绝对误差为

5.857 cm,误差约为6.89%,说明在拍照条件固定的情况下,该算法检测到的水样透明度与水样实际透明度相差较小,能够作为检测水样透明度的方法在工程实际中使用。例如,对图3中三种透明度的预测值分别为78.0、34.9、15.8 cm。

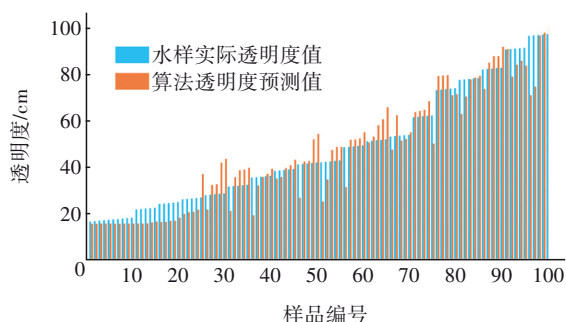


图5 水样透明度实际值与预测值的比较

Fig.5 Comparison of actual and predicted water transparency values for validation data water samples

本研究提出的基于计算机视觉的透明度快速检测算法在统计学上属于回归模型,对其预测结果进行统计学参数验证,根据研究目的与数据特点选取了5种回归模型评价指标进行评估,分别为均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、平均绝对百分比误差(MAPE)以及决定系数(R^2)。在拟合数据与验证数据上计算的各个指标结果如表3所示。

表3 回归模型评价指标结果

Tab.3 Results of regression model evaluation indicators

数据来源	MSE/cm ²	RMSE/cm	MAE/cm	MAPE	R^2
拟合数据	31.791	5.638	4.049	0.127	0.911
验证数据	57.809	7.603	5.857	0.146	0.902

由表3可见,拟合数据的结果略优于验证数据,但由于推理公式是在拟合数据上拟合得到,故主要针对验证数据上的评价指标进行分析。本算法的MAE为5.857 cm、MAPE为0.146,这表明预测结果与真实值之间偏差较小,采用该算法预测具有较高的准确性。 R^2 为0.902,意味着该算法能够解释约90.2%的因变量方差,这表明该模型具有较强的解释能力,能够较好地拟合观测数据。

综上所述,该算法在量程为15~100 cm范围内的预测结果具有较高的准确性和解释能力,能够在工程实际中作为可信的水样透明度检验方法使用。

3 快速检验技术实用性验证

本研究提出的基于计算机视觉的水样透明度快速检测算法具有自动化运行、准确度高等优点,但受限于其原理,图片拍摄时的光照条件、穿透水样厚度、水体流动情况等均会对拍摄图片质量产生较大影响,从而影响其BRISQUE质量得分,进而导致透明度检测准确度降低。为了增强算法检测的准确性,确保该方法在不同真实场景下的可使用性,设计并开发了一款水样透明度拍照检测盒,为水样图片拍摄提供稳定的光照条件、穿透水样厚度以及保持图片拍摄时水体处于稳定的层流状态,以确保在各种不同的外部场景下本方法均能够得到准确符合要求的透明度检测结果。

为验证在不同条件下水样透明度拍照检测盒均能够提供稳定的拍照条件,确保透明度检测方法的准确性,通过改变光照、温度、室内或室外等不同外部环境,对同一个水样进行拍照,共拍摄332张图片。采用透明度检测算法处理这些图片,得到透明度分布。结果显示,实测透明度为74.5 cm,透明度检测值的范围为68.258~77.937 cm,误差范围为-8.38%~4.61%。对结果进行Bland-Altman一致性评价,结果如图6所示。可见,绝大部分数据点均落在上下边界内,只有不到3%的点低于下边界,一致性较好。说明无论外部条件如何,水样透明度拍照检测盒均能够提供稳定的拍照条件,确保了所提出的基于透明度的分散式污水设备处理效果快速检验技术的可用性。

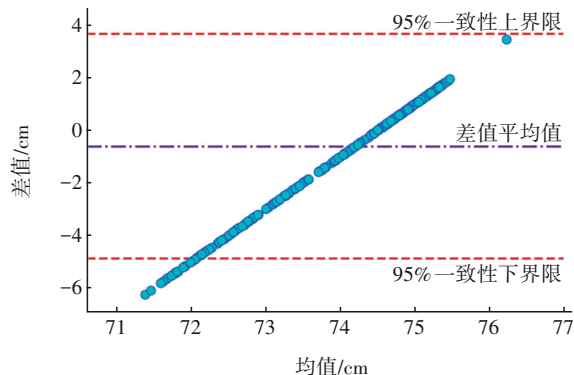


图6 Bland-Altman 一致性评价结果

Fig.6 Bland-Altman conformance evaluation results

4 结论

① 提出了以生活污水透明度值为评价标准,通过自动化方法检测出水透明度,进而通过其判断

生活污水处理设施处理效果是否达标的方法。

② 生活污水主要的水质指标与透明度间存在显著相关关系,可以采用透明度作为生活污水的整体水质表征指标,以评价生活污水处理设施的处理效果,且根据不同水质指标的排放标准给出了判断设施处理效果达标的出水透明度建议值。

③ 提出了基于计算机视觉的水样透明度快速检测算法。首先发现水样照片BRISQUE图片质量评估得分与水样透明度之间存在明显的相关关系,并得出了准确度较高的计算公式。再用实际水样进行验证,通过统计学分析验证了检测算法的误差满足工程要求。

④ 为满足基于计算机视觉的水样透明度快速检测算法对图像拍摄的要求,开发了水样透明度拍照检测盒,确保了每次拍照都处于相同的稳定状态,提高了该快速检验技术的实用性。

参考文献:

- [1] 何飞添. 农村分散式生活污水处理设施的水质监测研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(16): 138-139, 151.
HE Feitian. Research on water quality monitoring of rural decentralized domestic sewage treatment facilities [J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2023, 4 (16): 138-139, 151 (in Chinese).
- [2] 韩小波, 王维康, 李燕, 等. 高密度城区人工景观湖(深圳荔枝湖)综合治理[J]. 中国给水排水, 2023, 39(2): 120-124.
HAN Xiaobo, WANG Weikang, LI Yan, *et al.* Comprehensive treatment of artificial landscape lake in high density urban area: a case of Lizhi Lake in Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(2): 120-124 (in Chinese).
- [3] 仰忠萍, 翁飞霞, 徐秋芹, 等. 染整废水透视图处理现状及存在的问题[J]. 能源与环境, 2016(2): 85-86, 89.
YANG Zhongping, WENG Feixia, XU Qiuqin, *et al.* Current status and problems of perspective treatment of dyeing and finishing wastewater [J]. Energy and Environment, 2016 (2): 85-86, 89 (in Chinese).
- [4] 陈一飞. 印染废水的透视图与SS色度相关性研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(8): 73-76.
CHEN Yifei. Correlations between transparency, SS and chroma in printing and dyeing wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31 (8): 73-76 (in Chinese).
- [5] 陈一飞. 染整放流水的透视图与相关因素及其处理方法[J]. 能源与环境, 2010(5): 4-6.
CHEN Yifei. Perspective of dyeing and finishing runoff water and related factors and their treatment methods [J]. Energy and Environment, 2010 (5): 4-6 (in Chinese).
- [6] 陈一飞. 影响染整废水透视图的因素及其解决方法[J]. 纺织科技进展, 2010(2): 1-3, 6.
CHEN Yifei. The influential factors and solution on transparency of dyeing and finishing wastewater [J]. Progress in Textile Science & Technology, 2010 (2): 1-3, 6 (in Chinese).
- [7] 杨琨. 以透视图作为主要评价指标的日本净化槽净水特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
YANG Kun. A Study of Wastewater Treatment Characteristic of Japanese Johkasou Using Transparency as the Main Evaluation Index [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014 (in Chinese).
- [8] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. No-reference image quality assessment in the spatial domain [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21 (12): 4695-4708.

作者简介: 陈泊明(1999-), 男, 江西上饶人, 硕士研究生, 主要研究方向为农村污水处理智能化。

E-mail: cbm21@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2024-04-10

修回日期: 2024-05-22

(编辑: 李德强)