

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.058

不同进水负荷下膜生物反应器错流速度动态控制方法

范巍¹, 黄志伟²

(1. 苏伊士环境科技(北京)有限公司, 北京 100026; 2. 黄河水利职业技术学院 机械工程学院, 河南 开封 475003)

摘要:研究不同进水负荷下化工膜生物反应器错流速度动态控制方法。将蒽酮试剂作为多糖含量测量试剂, 确定污泥粒径, 得到生物反应器错流速度动态控制结果, 从而完成膜生物反应器错流速度动态控制。证明膜生物反应器错流速度与进水时间点、含气率、曝气孔位置、控制剪切速度均有关。因此, 研究不同进水负荷下膜生物反应器错流速度动态控制可以减轻膜污染发展速率。

关键词:进水负荷; 膜生物反应器; 错流速度; 动态; 控制方法

中图分类号: TQ028.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)01-0309-06

Dynamic Control Method for Cross Flow Velocity of Membrane Bioreactor under Different Influent Loads

FAN Wei¹, HUANG Zhiwei²

(1. SUEZ Environment Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100026, China;

2. College of Mechanical Engineering, Yellow River Conservancy Vocational and Technical University, Kaifeng 475003, China)

Abstract: This paper studies the dynamic control method of cross flow velocity in chemical membrane bioreactors under different influent loads. The anthrone reagent was used as a polysaccharide content measurement reagent to determine the sludge particle size and obtain the dynamic control results of the cross flow velocity in the bioreactor, thus completing the dynamic control of the cross flow velocity in the membrane bioreactor. The results show the cross flow rate of membrane bioreactor is related to the inlet time point, gas content, aeration hole position, and controlled shear rate, and the study on the dynamic control of cross flow velocity in membrane bioreactors under different influent loads can reduce the development rate of membrane fouling.

Keywords: inflow load; membrane bioreactor; cross flow velocity; dynamic; control method

0 引言

膜生物反应器是一种将高效膜分离技术与生物降解过程相结合的新型污水处理系统, 在化工废水处理领域具有显著优势^[1]。该系统由浸没式或外置式膜组件与生物反应器构成, 能够维持反应器内混合液悬浮固体浓度高达 8~15 g/L, 远高于传统活性污泥法。在化工废水处理过程中, 膜生物反应器系统通过微生物代谢有效降解废水中的苯系物、卤代烃等难降解有机物, 同时利用微滤或超滤膜实现精准固液分离, 出水浊度可稳定低于 0.5 NTU, 对 COD 的去除率可达 95% 以上。相较于传统工艺, 膜生物反应器系统具有三大突出优势: 1) 可完全截留微生物菌群, 使硝化细菌等专性菌种的污泥龄延长至 30 d 以上, 显著提升对氨氮、总氮的处理效果; 2) 系统污泥产率系数低至 0.2~0.3 (kgMLSS/kgCOD), 较常规工艺减少 40%

污泥产量; 3) 模块化设计使其占地面积仅为传统工艺的 1/3~1/2, 特别适合用地紧张的化工园区。实际运行数据表明: 该技术对含酚废水、农药废水等典型化工废水的 COD 去除负荷可达 3~5 kg/(m³·d⁻¹), 且出水水质稳定达到 GB31571—2015《石油化学工业污染物排放标准》特别排放限值要求。但是, 膜生物反应器也存在一定的局限, 在不同进水负荷下可能产生膜污染^[2], 造成膜通量下降, 需要频繁更换膜组件, 运行成本较高。因此可以进行错流处理, 按照一定的角度调整流经膜组件水流, 防止生物膜脱落, 提高传质效率。

研究表明, 可能影响膜生物反应器错流速度的因素较多。1) 泵流量, 适当增大泵流量可能会提高冲刷效果, 降低膜污染^[3], 但可能受过强剪切作用影响, 导致污染加剧; 2) 膜组件设计布局, 与水流在膜表面的分布效果有关; 3) 生物反应器的几何尺寸, 包括反应器设置水流通道的宽度、高度

基金项目: 河南省职业教育教学改革研究与实践项目 (2021SJGLX757)

第一作者简介: 范巍 (1980—), 男, 陕西合阳人, 高级工程师, 本科, 研究方向为环境工程自动化, fan801wei@163.com。

等;4)污泥浓度,当污泥浓度发生变化后,反应器水流中的固体颗粒可能发生沉积,形成阻力较大的污泥层,无法维持较高的错流速度^[4];5)曝气强度,不同的曝气强度引发的气泡与水流扰动不同,可以降低凝胶层的形成速度,降低错流速度下降幅度,但曝气强度过高时存在剪切力作用,会增加总能耗;6)水质特性,包括水的 pH 值、温度等,与水的流动状态相关^[5]。进行膜生物反应器错流速度动态控制具有重要意义,可以优化传质效果,将污染物与微生物充分接触,提高处理效率,增强污染物处理能力;可以控制颗粒沉积状态,避免出现浓差极化问题,降低清洗频率;可以平衡能耗处理效果^[6-7],并从根本上降低膜组件成本,延长使用寿命,适应各种工况条件。

因此,针对化工废水处理系统中不同进水负荷,采用 AnMBR 作为实验工艺结构,确定 TMP 变化状态,将 0.5% 次氯酸钠作为试剂完成化学清洗,以满足污水处理与生态环境优化等方面的应用需求。

1 材料与准备

采用 AnMBR 作为实验工艺结构^[8-9],其主要由主体反应区与膜区共同组成,有效容积为 15 L/16 L,如图 1 所示。

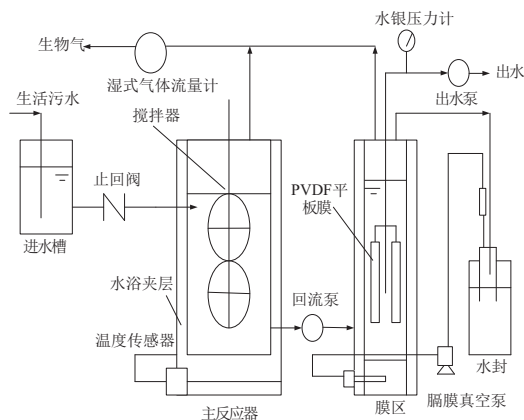


图1 AnMBR 实验工艺结构

由图 1 可知,该实验工艺结构将搅拌器作为主体结构,预设了基础搅拌速度^[10-11]。为了满足完全混合反应要求,设置了 3 片 PVDF 材料的平面膜,膜孔径设置为 0.2 μm,有效面积为 0.735 m²。实验主体区通过水浴加热完成温度调节,进行 AnMBR 蠕动泵调控^[12-13]。外部使用 N810 完成生物气循环,确定 TMP 变化状态,将 0.5% 次氯酸钠作为试剂完成化学清洗。

实验进水选用化工合成废水,pH 值在 7.5~7.8 之间,浓度比例适中^[14-15],化工合成废水的成分与浓度如表 1 所示。

表1 实验化工合成废水的成分与质量浓度

单位:mg/L

组成成分 (大量元素)	含量	组成成分 (大量元素)	含量
NH ₄ ⁺ -N	75~200	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.160
NO ₂ ⁻ -N	75~200	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.240
NaHCO ₃	771.6	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.204
KH ₂ PO ₄	79.2	NiCl ₂ ·6H ₂ O	0.190
FeSO ₄ ·7H ₂ O	9.14	NaMoO ₄	0.220
H ₃ BO ₃	0.011	CaCl ₂	0.441
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.90	MgCl ₂	0.726

由表 1 可知,为了确定膜生物反应器错流速度动态最佳控制时间,实验设置了多负荷变量^[16-17],整合为满足生物气循环量的基础参数操作条件,如表 2 所示。

表2 AnMBR 运行工况操作参数

工况	温度/ ℃	COD 容积负荷/ (kg/m ³ ·d ⁻¹)	S _{RT} /d	ρ(MISS)/ (g/L)	ρ(MLVSS)/ (g/L)
1	35	3.0	430	12.14±0.92	5.92±0.97
2	25	3.0	430	10.76±2.30	5.93±1.18
3	35	1.5	430	6.90±1.16	3.86±0.25
4	25	1.5	430	5.46±0.77	3.67±0.61

由表 2 可知,待上述操作参数设置完毕后需要测定划分膜阻力 R_t ,如式(1)所示。

$$R_t = R_c + R_p + R_m \quad (1)$$

式中: R_c 代表泥饼层阻力; R_p 代表膜孔阻力; R_m 代表膜本身阻力^[18-19]。在膜阻力测定过程中,可按照运行重点进行集中调整,使用物理擦拭法消除清洗阻力差^[20],利用达西定律计算此时的膜通量 J ,如式(2)所示。

$$J = T_{MP} / (\mu R) \quad (2)$$

式中: T_{MP} 为跨膜压差; μ 为黏度动力系数; R 为膜黏度。此时可以使用薄片刮下膜表面污染物,放置于 250 mL 蒸馏水中^[21-22],充分搅拌混合,测定混合液悬浮固体 (MLSS)、挥发性悬浮固体 (MLVSS) 等含量,对 COD 等溶解性物质进行过滤。使用国标方法完成综合分析,将蒽酮试剂作为多糖含量测量试剂,通过 Lowry 法测定^[23-24],划

分 GC-TCD 生物气组,再利用 Mastersizer300 激光粒度分析仪确定污泥粒径。溶解性微生物产物可以进行离心混合处理,放置于锥形瓶中完成水浴加热,再通过定性滤纸过滤^[25],得到生物反应器错流速度动态控制结果。

2 结果与讨论

2.1 膜生物反应器错流速度动态控制进水时间点结果

实验在维持进水氨氮与亚硝酸盐氮初始质量浓度比例(1:1)不变的条件下,逐步将进水氨氮与亚硝酸盐氮的质量浓度同步提升至 100 mg/L、125 mg/L、150 mg/L、175 mg/L、200 mg/L,对应调整进水负荷,并严格控制反应器内温度与 pH 值于设定工况范围。在此过程中,反应器 MLSS 及 MLVSS 浓度随运行时间的变化情况如图 2 所示。

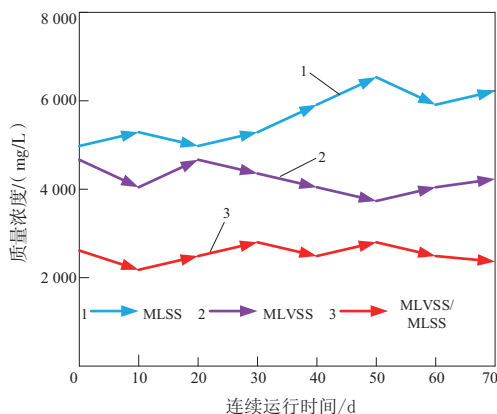


图2 反应器 MLSS/MLVSS 变化状态

由图 2 可知,随着反应器运行时间的延长,MLSS 浓度呈现上升趋势,而 MLVSS/MLSS 比值整体呈下降态势,表明系统内惰性固体组分有所累积,同时反映出厌氧氨氧化菌的生长速率可能趋于减缓。基于此变化特征,为探究进水时间点对错流速度控制的影响,选取运行期间具有代表性的时间点(分别对应第 7 天、第 16 天、第 22 天、第 30 天、第 36 天、第 43 天、第 59 天、第 68 天,标记为 T1—T8)进行分析。各时间点对应的污泥颗粒粒径分布状态如图 3 所示(本刊黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

由图 3 可知,反应器厌氧氨氧化菌平均粒径随反应器变化逐渐增大,比例分布合理,不同反应周期下的比例趋势变化拟合,证明此时反应器内的反应状态良好,预设的反应器氨氮进水质量浓度分别为 100 mg/L、125 mg/L、150 mg/L、175 mg/L、

200 mg/L,负荷逐渐增长,将去除率作为有效指标(去除率越高,反应器错流速度越合理),此时进行获取的膜生物反应器错流动态控制进水时间点结果如表 3 所示。

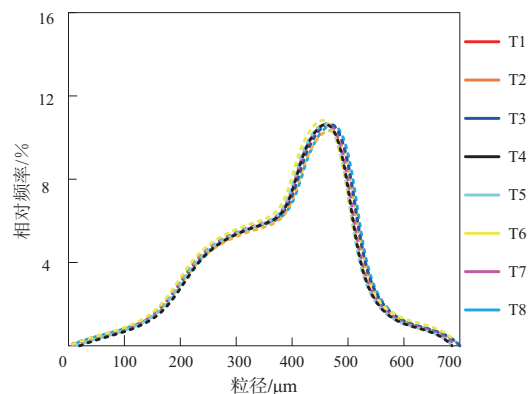


图3 反应器运行期间污泥粒径分布状态

表3 膜生物反应器错流动态控制进水时间点结果

进水时间 点	不同氨氮进水浓度(进水负荷)下的污染物去除率/%				
	100 mg/L	125 mg/L	150 mg/L	175 mg/L	200 mg/L
T1	94.54	96.14	99.25	97.35	93.52
T2	92.21	95.74	97.18	95.45	90.24
T3	91.47	94.23	96.53	93.24	88.23
T4	88.85	92.98	95.64	92.38	86.98
T5	84.23	90.48	92.18	90.62	84.25
T6	82.69	89.26	90.25	89.83	82.71
T7	83.85	83.97	89.96	87.46	80.28
T8	80.42	81.25	88.52	82.59	76.39

由表 3 可知,无论在何种氨氮进水浓度下,随着时间的推移,污染物的去除率均呈现出整体下降的趋势。这是由于反应器内微生物活性的降低、污染物的积累或其他运行参数的变化导致的。不同氨氮进水质量浓度下的去除率存在显著差异。在较低的进水质量浓度(如 100 mg/L)下,去除率相对较高;而在较高的进水质量浓度(如 200 mg/L)下,去除率则相对较低,由此可知,进水负荷增加会适当增加反应器错流速度的适应效果。在不同进水质量浓度下,去除率的稳定性也存在差异。在较低质量浓度下,去除率的波动相对较小;而在较高质量浓度下,去除率的波动则较大。这可能与反应器对不同负荷的适应能力有关。

在反应器的初期运行阶段(如第 7 天),各质

量浓度下的去除率均相对较高。这是由于反应器内微生物处于活跃状态,对污染物的降解能力较强。随着运行时间的延长(如第59天、第68天),各质量浓度下的去除率均显著下降。这是由于反应器内微生物活性的降低、污染物的积累或反应器内部结构改变导致的。

2.2 膜生物反应器错流速度动态控制含气率结果

保证初始流场处于稳定状态,在远离膜面57 mm处设置平衡模型,对进水气泡直径尺寸进行模拟,设置的原始气泡直径为0.1 mm、1.0 mm、3.0 mm(随气泡直径增加,其进水负荷逐渐下降),气泡直径-含气率分布如图4所示。

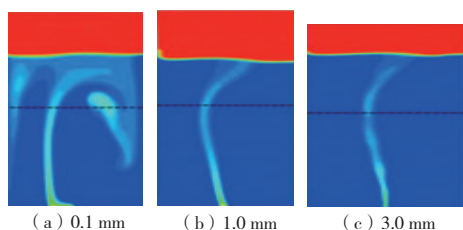


图4 气泡直径-含气率示意图

由图4可知,随着气泡直径增加,轴向液速峰值逐渐降低,气泡相互作用增加,反应器反应效率下降,由此可知,进水负荷越低,反应器反应效果越差。

改变曝气流量,设置曝气速度分别为0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s(曝气速度越高进水负荷越高),保持曝气孔位置不变,膜生物反应器含气率分布如图5所示。

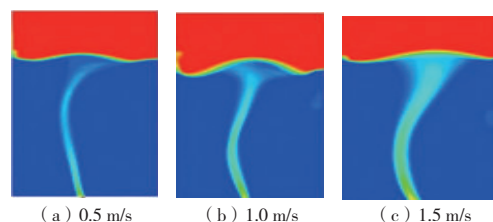


图5 曝气速度-含气率示意图

由图5可知,在曝气速度增长状态下,反应器的含气率逐渐增加,反应状态与反应面积良好,能保证错流速度处于有效范围内,得到的膜生物反应器错流速度动态控制含气率结果如表4所示。

表4 膜生物反应器错流速度动态控制含气率

单位: %

参数	数值									
含气率	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
污染物去除率	80.55	82.42	85.23	88.36	91.69	95.97	90.85	81.56	75.69	65.97

由表4可知,当含气率在5%~30%的范围内时,污染物去除率随着含气率的增加而逐渐提高。特别是从15%增加到30%时,污染物去除率的提升较为明显,从85.23%提升至95.97%。当含气率超过30%后,污染物去除率开始下降。在35%~50%的含气率范围内,随着含气率的增加,污染物去除率显著降低。当含气率为30%时,污染物去除率达到最高值95.97%。因此,可以认为在膜生物反应器中,30%左右的含气率是实现高效污染物去除的最佳范围。膜生物反应器中错流速度的动态控制对含气率及污染物去除率具有重要影响。为了高效去除污染物,应合理调节错流速度以维持适宜的含气率范围。

2.3 膜生物反应器错流速度动态控制曝气孔位置结果

保持气泡柱两测液相满足漩涡流场状态,对膜面流域变化而变化,修正壁面限制,已知曝气孔与膜面距离越大,进水负荷越低。膜生物反应器错流速度动态控制曝气孔位置结果如图6所示。

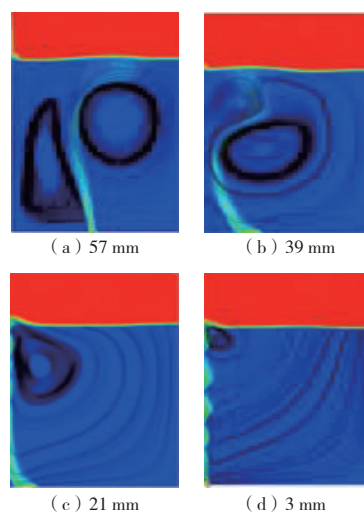


图6 错流速度动态控制曝气孔位置结果

由图6可知,随曝气孔与膜面距离增长,膜生物反应器的反应效率随之下降,逐渐达不到标准错流速度要求,因此,在错流速度动态控制时应尽量降低曝气孔与膜面距离。

2.4 膜生物反应器错流速度动态控制剪切速度结果

按照膜面抽吸压状态调整剪切力,已知进水

负荷越高,剪切力越大,在满足抽吸负压要求的基础上得到的膜生物反应器错流速度动态控制剪切速度结果如表 5 所示。

表 5 反应器错流速度动态控制剪切速度结果

参数	数值									
剪切速度/(m/s)	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
污染物去除率/%	70.58	74.12	76.33	78.58	80.41	82.28	84.63	88.98	95.27	98.82

由表 5 可知,当剪切速度从 0.02 m/s 增加到 0.20 m/s 时,污染物去除率呈现出逐渐上升的趋势。这表明剪切速度的增加有助于提升污染物的去除效率。在剪切速度从 0.16 m/s 增加到 0.20 m/s 的过程中,污染物去除率的提升尤为显著,从 88.98% 跃升至 98.82%。这显示了在这一速度范围内,剪切速度对污染物去除率的强大正面影响。随剪切速度增加,反应器的反应效果逐渐变优,由此可知,控制剪切速度可以有效调整反应器错流速度。

3 结语

通过对化工废水处理中不同进水负荷的分析,掌握了膜生物反应器错流速度动态控制方法。结果表明:进水负荷增加会适当增加反应器错流速度的适应效果。不同化工废水进水质量浓度下,去除率的稳定性也存在差异。随着气泡直径增加,轴向液速峰值逐渐降低,反应器反应效率下降,进水负荷越低,反应器反应效果越差;在曝气速度增长状态下,反应器的含气率逐渐增加,反应状态与反应面积良好,能保证错流速度处于有效范围内,30%左右的含气率是实现高效污染物去除的最佳范围。在错流速度动态控制时应尽量降低曝气孔与膜面距离,保持适当范围;剪切速度的增加有助于提升污染物的去除效率,反应器的反应效果逐渐变优。进行膜生物反应器错流速度动态控制研究,可以降低膜阻力,有效调整膜通量,减少膜组件损耗,提高生物反应器的经济性与高效性。

参考文献:

[1] 汪浏志,赵频,宋伟龙,等. 面向城市污水高标准排放的多元耦合膜生物反应器运行性能研究[J]. 水处理技术,2025,51(2):128-133.

[2] 尹洪位,卢星宏,周天寿. 封闭式光生物反应器中微藻生长的建模与控制[J]. 江西师范大学学报(自然科学版),2023,47(4):342-349.

[3] 张栋,虞鉴申,胡天天,等. 一体式平板膜生物反应器

处理商场污水的运行效能及膜污染研究[J]. 水处理技术,2023,49(8):82-86.

[4] 潘伟亮,谭秀晴,欧阳荭霖,等. 生物炭强化厌氧膜生物反应器处理废水性能的研究进展[J]. 工业水处理,2024,44(4):38-45.

[5] 肖小兰,干永鹏,冯永锐,等. 膜生物反应器(MBR)处理不同浓度高硫酸盐有机废水污泥性质和膜污染研究[J]. 环境化学,2023,42(8):2754-2766.

[6] 查璐璐,胡以松,唐陆合,等. 重力驱动式动态膜生物反应器的膜清洗再生方式优化研究[J]. 水处理技术,2024,50(10):103-108.

[7] 张新政,范煜秦,薛意,等. 厌氧膜生物反应器处理酰胺工业废水的碳中和潜力——能源回收与碳减排[J]. 环境工程学报,2024,18(9):2637-2646.

[8] 田家宇,司文艳,耿明月,等. NaOH/PMS 对 MBR 中空平板陶瓷膜的化学清洗特性[J]. 中国给水排水,2024,40(15):16-22.

[9] 高珊珊,解冰瀚,耿明月,等. 粉态硫自养反硝化膜生物反应器(p-SMBR)的优化调控:水力停留时间和膜通量的影响[J]. 环境工程学报,2024,18(6):1604-1613.

[10] 倪凌峰,王沛芳,王亚宜. 电化学氧化技术在 MBR 中的膜污染控制研究与应用进展[J]. 哈尔滨工业大学学报,2024,56(10):127-135.

[11] 庞家平,李恒鹏,李俊,等. 木片反硝化生物反应器对农业面源污水氮去除的研究进展[J]. 生态与农村环境学报,2024,40(11):1463-1472.

[12] 司马聪,张新波,程衍斌,等. DeMFC-AnMBR 耦合系统处理含磺胺嘧啶养猪废水的性能研究[J]. 工业水处理,2024,44(10):68-75.

[13] 赵子亮,韩智勇,李浩,等. 农村生活垃圾厌氧/准好氧生物反应器堆肥产物的安全性分析[J]. 环境污染与防治,2024,46(2):193-199.

[14] 宋建超,尚斌,陶秀萍,等. 中试膜生物反应器处理奶牛养殖污水的微生物群落结构分析[J]. 农业环境科学学报,2024,43(9):2093-2103.

[15] 鄢若麟,曲立威,羌金凤,等. MES-AnMBR 耦合工艺处理模拟偶氮染料废水及膜污染特性研究[J]. 化工环保,2023,43(5):606-612.

- [16] 汤凯,宋灿辉,曹茜斐,等. 低耗往复式膜生物反应器系统的中试应用研究[J]. 中国环境科学, 2025, 45(2):727-735.
- [17] 王斌儒,司海瑞,张乐年. 无线流速监测系统的研究与实现[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(5):206-210.
- [18] 胡瑜,王锁芳,梁晓迪. 基于响应曲面法的涡旋管分离器结构优化[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(3):166-171.
- [19] 邵斌,王蕊,代攀,等. 碳修饰的铁基催化剂催化降解膜生物反应器出水中有机污染物[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(2):206-213, 232.
- [20] 郑榆凯,欧阳肖,朱仁诚,等. 饱和填充生物膜反应器生物膜周期性变化特征[J]. 中国给水排水, 2024, 40(19):75-80.
- [21] 张昱,王辰,韩子铭,等. 厌氧膜生物反应器处理抗生素废水研究进展与展望[J]. 环境工程学报, 2024, 18(3):623-633.
- [22] 袁昌荣,孙中圣,李小宁. 热膜式气体流量传感器异物污染流场仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(4):89-91.
- [23] 刘佳乐,雷振,崔耀奎,等. 厌氧膜生物反应器处理市政污水的产甲烷性能及微生物代谢特征[J]. 环境科学研究, 2023, 36(5):932-942.
- [24] 马子欣,文敬博,蒋林巧,等. 重力流膜生物反应器处理农村污水效能与机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(6):16-24.
- [25] 刘壮壮,鞠然,刘崇涛,等. 电化学膜生物反应器处理污水性能提升策略及研究现状[J]. 化工学报, 2023, 74(11):4433-4444.

收稿日期:2025-05-05

(上接第286页)

- [6] 李强. 基于数字孪生技术的城市洪涝灾害评估与预警系统分析[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(5):476-485.
- [7] 曾世伟,侯学会,王宗良,等. 基于无人机遥感的作物表型参数获取和应用研究进展[J]. 山东农业科学, 2024, 56(4):172-180.
- [8] 张芸硕. 无人机遥感技术在水库泄洪预警系统中的应用[J]. 水利技术监督, 2017, 25(4):38-40.
- [9] 高龙,阎福礼. 基于 Sentinel-1A SAR 影像的上下游水位响应分析及其在洪涝预警中的应用[J]. 中国科学院大学学报, 2022, 39(1):91-101.
- [10] 蒋曦阳,黄健鹏,童一飞,等. 基于物联网的电梯故障监测与预警系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(6):213-216, 220.
- [11] 杨文兵. 农田灌溉管理中无人机遥感技术的应用[J]. 乡村科技, 2022, 13(1):153-155.
- [12] 韩佳. 遥感测绘技术在滑坡灾害预警中的应用[J]. 华北自然资源, 2025(1):79-81.
- [13] 黄春建. 地质灾害监测与预警系统的校地联合研发[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(1):252.
- [14] 肖武,任河,赵艳玲,等. 无人机遥感支持下的煤矸石山自燃监测与预警[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2):412-421.
- [15] 刘小莎,董秀军,钱济人,等. 高植被山区泥石流物源 LiDAR 遥感精细识别方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(3):400-410.
- [16] 廉旭刚,韩雨,刘晓宇,等. 无人机低空遥感矿山地质灾害监测研究进展及发展趋势[J]. 金属矿山, 2023(1):17-29.
- [17] 朱俊清,赵学儒,马涛,等. 基于卫星遥感的路域地质灾害监测方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(6):1861-1872.
- [18] 张俊阳,王昆,赵同彬,等. 矿区地表沉陷与裂缝无人机遥感观测研究现状及发展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(增刊2):435-444.

收稿日期:2024-10-29