

加载连续流电磁波对回流污泥脱氢酶活性的影响

桑稳姣¹, 丰洋洋¹, 李 栋¹, 周桑榆², 王金羽³, 张宛君⁴,
徐 茜⁴

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉科技大学 医学院,
湖北 武汉 430065; 3. 武汉科技大学 管理学院, 湖北 武汉 430065; 4. 中国市政工程
中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 为了探究加载电磁波对回流污泥的影响,选取脱氢酶活性为代表,取污水处理厂回流污泥,采用连续流 2 450 MHz 电磁波进行加载,探究电磁波加载功率、加载时间和污泥流量对污泥生物活性的影响,考察将电磁波加载污水处理厂回流污泥实现污泥过程减量的可行性。当电磁波加载功率为 100 W 时,污泥脱氢酶活性提高了 85.38%;在加载功率为 100~600 W、加载时间为 25~150 s 时,脱氢酶活性呈显著下降趋势,且与污泥温度和上清液 SCOD 呈此消彼长之势;当污泥流量为 2 L/h 时,污泥脱氢酶活性突然显著降低,之后随污泥流量增大则活性逐渐上升。相关性分析结果显示,污泥脱氢酶活性与加载功率、加载时间呈显著负相关,与污泥流量呈显著正相关,影响程度的大小顺序为:污泥流量>加载功率>加载时间;同时,污泥脱氢酶活性与温度、SCOD 均呈显著的负相关。

关键词: 电磁波; 回流污泥; 脱氢酶活性; SCOD; 相关性分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)23-0014-07

Effect of Continuous Flow Electromagnetic Wave Loading on Dehydrogenase Activity of Returned Sludge

SANG Wen-jiao¹, FENG Yang-yang¹, LI Dong¹, ZHOU Sang-yu²,
WANG Jin-yu³, ZHANG Wan-jun⁴, XU Qian⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Medicine, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 3. School of Management, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 4. Central Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: To verify the feasibility for reduction of sludge through electromagnetic wave loading returned sludge, dehydrogenase activity was selected as the representative, and the effects of loading power, loading time and sludge flow on the dehydrogenase activity of returned sludge taken from sewage treatment plant were studied under the continuous flow electromagnetic wave with 2 450 MHz. The results showed that the dehydrogenase activity of returned sludge increased by 85.38% when the electromagnetic wave power was 100 W. However the dehydrogenase activity showed a significant downward trend and was negatively related to the sludge temperature and SCOD of supernatant when the loading power and

loading time were 100 – 600 W and 25 – 150 s respectively. In addition, the dehydrogenase activity decreased rapidly when the sludge flow was 2 L/h, and then it gradually increased with the increase of sludge flow. The results of correlation analysis revealed that the dehydrogenase activity was negatively correlated with the loading power and loading time of electromagnetic wave, temperature and SCOD, while positively correlated with the sludge flow. The influence level of the factors was: sludge flow > loading power > loading time.

Key words: electromagnetic wave; returned sludge; dehydrogenase activity; SCOD; correlation analysis

近年来,电磁波技术在环境领域的运用越来越广泛。关于电磁波生物效应的研究发现,电磁波会破坏菌体细胞壁、细胞膜等致使胞内物质外泄,从而影响生物的活性。Woo 等^[1]在对菌体细胞进行微波处理时观察到细胞壁受损破裂的现象;Eskicioglu 等^[2]发现细胞膜吸收微波而自身受损,菌体胞内物质泄漏最终导致细胞死亡;胡坚^[3]研究表明微波能改变微生物 DNA 和蛋白质的结构,从而破坏细胞的正常新陈代谢功能;田禹等^[4,5]也发现在电磁波作用下,污泥絮体结构被破坏,污泥上清液 SCOD、TN、核酸等有机物浓度显著上升。

污泥的过程减量研究一直受到关注。回流污泥的生物种群结构,必将影响工艺构筑物内的生物种群结构,从而影响最终的出水水质及剩余污泥量。目前,利用静态电磁波的溶胞作用,破解剩余污泥再利用达到污泥减量的研究已出现。王亚伟等^[6~8]的研究发现,在活性污泥系统中引入微波预处理单元后,系统最终的剩余污泥产量可降低 20% 以上,且出水水质未有恶化超标;Wang 等^[9]发现微波与酸碱、强氧化性物质等联用比单纯微波的溶胞效果好,且将经微波处理后的污泥返回至 CAS 系统后,能够使污泥产量降低 38.6%。

但截至目前,利用连续流电磁波加载回流污泥,利用其生物效应改变微生物菌种组成和结构,以期达到污泥过程减量的研究鲜有报道。而根据 Hong、Wang 等^[10,11]的研究结果,过量的电磁波能量作用于污泥时,会抑制污泥中生物 ETS 过程的进行,乳糖苷酶、过氧化氢酶等酶活性显著降低,甚至会导致生物体被灭活。因此,利用电磁波加载回流污泥时,需考虑其对污泥生物特性的影响,避免过剩的灭活作用而影响系统稳定运行。

笔者采用连续流 2 450 MHz 电磁波污泥加载装置,以污泥脱氢酶活性作为表征污泥生物活性的指

标,探究连续流电磁波加载功率、加载时间和污泥流量对污泥生物活性的影响,并结合污泥温度和污泥上清液中 SCOD 的变化,建立加载电磁波对污泥脱氢酶活性影响的预测模型,为探求电磁波加载回流污泥以实现污泥减量奠定理论基础。

1 试验材料与方法

1.1 污泥来源与试验装置

连续流电磁波加载装置见图 1,其中 2 450 MHz 电磁波发生装置在广东美的微波电器制造有限公司订购,电源选用深圳菊水皇家科技有限公司生产的 APS6005 变频稳压电源,污泥经雷弗 BT100s 蠕动泵和直径为 7.9 mm 的耐热硅胶管送入电磁波工作腔,腔体的尺寸为 315 mm × 305 mm × 205 mm。加载过程中,通过调节输入电压改变加载功率,通过改变腔体内输泥管长度调节加载时间,污泥流量由蠕动泵控制。

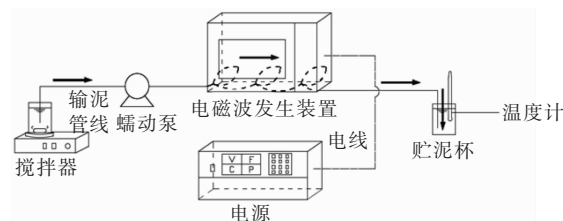


图 1 电磁波污泥连续流加载试验装置

Fig. 1 Continuous flow sludge loading system with 2 450 MHz electromagnetic wave

试验污泥取自武汉市沙湖污水处理厂 A²/O 工艺的回流污泥,经测定,其浓度为 6 700 mg/L,pH 值为 7.2,含水率为 97.51%,脱氢酶活性为 429.24 mgTF/(L · h),上清液 SCOD 为 20.85 mg/L,温度为 20 ℃。

1.2 试验方法

设计单因素试验,考察电磁波加载功率、加载时间、污泥流量 3 个因素对污泥生物活性的影响,且为

保证加载前污泥的性质稳定一致,每个参数组合仅做一次试验。根据桑稳姣等的研究结果^[12,13],确定加载功率为0~600 W,加载时间为0~150 s,污泥流量为0~12 L/h。

1.3 测定项目与方法

污泥上清液 SCOD:将污泥在 3 000 r/min 下离心 5 min 后,取上清液,按标准方法测定。污泥经电磁波加载后,冷却至室温并检测脱氢酶活性^[14]。

以作用在单位体积污泥上的电磁波能量(即能量密度)来探究加载能量对污泥脱氢酶活性的影响,并采用 SPSS19.0 软件进行相关性分析和数学模型建立。

2 结果与讨论

2.1 电磁波加载功率对污泥生物活性的影响

在加载时间为 50 s、污泥流量为 8 L/h 的条件下,电磁波加载功率对污泥脱氢酶活性、温度及上清液 SCOD 的影响见图 2。

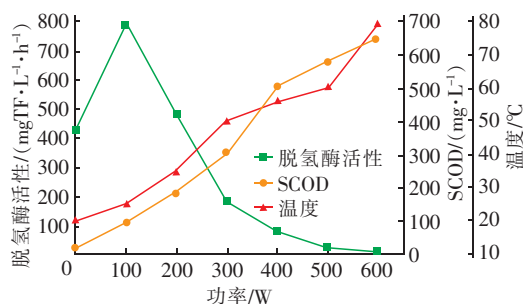


图2 电磁波加载功率对污泥脱氢酶活性、温度及上清液 SCOD 的影响

Fig. 2 Effect of loading power of electromagnetic wave on dehydrogenase activity, temperature and supernatant SCOD of sludge

在电磁波功率为0~100 W时,污泥脱氢酶活性迅速达到峰值,由原泥的429.24 mgTF/(L·h)上升至795.76 mgTF/(L·h),提高了约85.38%;此时,污泥上清液的 SCOD 溶出增多,由原泥的20.85 mg/L 上升至89.74 mg/L;温度升高较慢,仅上升了4℃,表现为非热效应。当加载功率为100~300 W时,温度上升迅速,而脱氢酶活性显著下降;加载功率为300~500 W时,温度上升速度减慢,污泥脱氢酶活性降幅趋缓,直至600 W时,污泥温度达到最高值为79℃;此时,污泥脱氢酶活性降至最低值为0.57 mgTF/(L·h)。

可见,当电磁波加载功率低于100 W时以非热效应为主,此时污泥中 SCOD 的溶出改善了生物的

营养条件,助其活性迅速被激活,脱氢酶活性达到峰值;当加载功率为100~400 W时,虽然污泥 SCOD 的溶出加快,但随着污泥温度的升高,污泥活性受到抑制,脱氢酶活性由峰值开始降低;当功率超过400 W后,SCOD 溶出变缓,温度继续升高,生物体逐渐适应,脱氢酶活性降幅也减小。说明随着温度的升高,生物体的酶蛋白变性导致生物体大量失活,要比 SCOD 溶出带来的底物浓度的增大对微生物的刺激效果更甚,故导致污泥的生物活性显著下降。

扫描电镜照片显示,加载100 W电磁波的污泥菌胶团被打碎,絮体结构更松散(见图3),污泥表面积增大,污泥颗粒间的传质阻力变小,菌胶团的气液传递效率增大;同时,因污泥上清液 SCOD 浓度上升,生物的营养物质增加,污泥生物活性增强。但随电磁波加载功率继续增大,温度持续升高,污泥中微生物细胞壁结构逐步被破坏,胞内物质大量溶出,导致污泥生物活性降低,直至消失。这与谢敏等^[15,16]的研究结果一致,即经微波辐射后,污泥絮体变松散,持续增加微波强度后微生物结构被破坏。

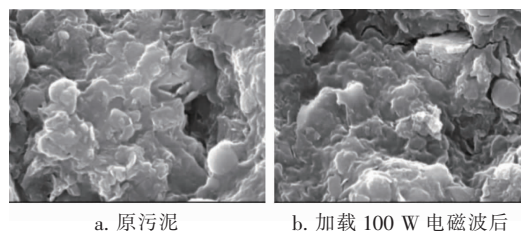


图3 加载电磁波前后污泥扫描电镜照片(×10 000)

Fig. 3 Scanning electron microscope of raw sludge and electromagnetic wave loaded sludge

2.2 电磁波加载时间对污泥生物活性的影响

在加载功率为300 W、污泥流量为8 L/h、加载时间为0~150 s范围内进行试验,结果如图4所示。随着电磁波加载时间的延长,污泥脱氢酶活性呈下降趋势;加载时间在25~75 s之间时,污泥脱氢酶活性下降最显著,在75 s后活性降低速度变缓,直至150 s时达到最低值为1.28 mgTF/(L·h)。与此同时,污泥上清液 SCOD 与脱氢酶活性表现出相反变化规律。当加载时间为25~75 s时,污泥上清液的 SCOD 上升迅速,直至75 s后增速变缓,在150 s时达最大值为641.36 mg/L。说明随着加载时间的延长,污泥中微生物接受到电磁波的能量不断增多,生物体细胞结构破坏程度增大,污泥生物活性降低。任伯帆等^[17,18]的研究表明,电磁波辐射时

间越长,污泥絮体和细胞结构被破坏程度越大。

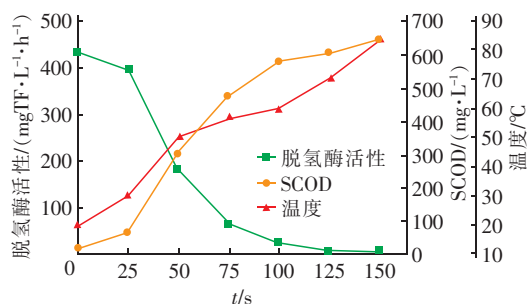


图4 电磁波加载时间对污泥脱氢酶活性、温度及上清液SCOD的影响

Fig. 4 Effect of loading time of electromagnetic wave on dehydrogenase activity, temperature and supernatant SCOD of sludge

由图4还可以看出,随加载时间增加,脱氢酶活性与温度呈此消彼长之势。当加载时间为0~50 s时,污泥温度上升迅速,超过50 s后,温度增速变缓;在100 s时温度达60 °C,污泥脱氢酶活性由原泥的429.24 mgTF/(L·h)降至20.97 mgTF/(L·h);在加载时间为150 s时,温度升至峰值(82 °C),此时的脱氢酶活性几乎全部丧失。明显看出,电磁波加载污泥温度达60 °C后,大部分微生物被灭活,说明污泥的脱氢酶蛋白活性敏感温度为60 °C,当温度超过60 °C后,在电磁波对生物体结构的破坏与高温灭活的双重作用下,污泥的生物活性大量丧失。

2.3 污泥流量对生物活性的影响

在加载功率为300 W、加载时间为50 s、污泥流量为0~12 L/h范围内进行试验,结果如图5所示。

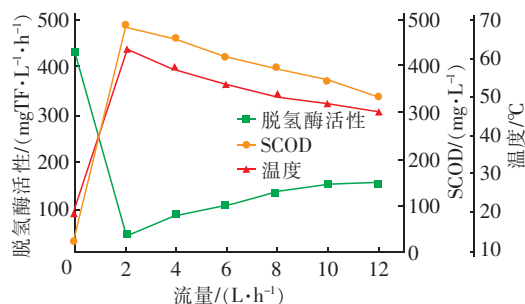


图5 污泥流量对脱氢酶活性、温度及上清液SCOD的影响

Fig. 5 Effect of sludge flow on dehydrogenase activity, temperature and supernatant SCOD of sludge

当污泥流量为2 L/h时,脱氢酶活性突然降至最低值即36.89 mgTF/(L·h),污泥温度和上清液SCOD同时达到峰值,分别为62 °C和486.45 mg/L;

污泥流量大于2 L/h后,污泥活性随着污泥流量的增加呈恢复之势,污泥温度和上清液SCOD则逐渐下降。

分析认为,当电磁波加载功率和时间不变时,随污泥流量的增加,单位管长污泥接受的能量降低,微生物活性降幅减小,故当污泥流量由2 L/h增至10 L/h过程中,热效应减弱,污泥温度由62 °C降至48 °C,污泥细胞结构破坏程度降低,溶出效应减弱,污泥上清液SCOD由486.45 mg/L降至366.62 mg/L,脱氢酶活性降幅变小,并逐步恢复。

当污泥流量大于10 L/h后,污泥的脱氢酶活性基本保持不变,说明污泥流量仅在一定的范围内会对微生物活性产生影响,继续增加污泥流量,生物活性保持稳定。表明电磁波加载技术可通过调节加载条件,实现污泥胞内溶出物的增多与污泥生物量之间的平衡,为将电磁波加载于污水处理过程中的回流污泥提供了依据。

根据任伯帜等^[19]的研究结果,在微波辐射下,污泥流量改变带来的流态变化亦会影响污泥破解程度,当增加污泥流量,使 Re 从500增加至3 000时,污泥流态从层流过渡到紊流,污泥颗粒间的剪切力增加,微波破解污泥程度上升,且微波功率越大,流态变化带来的污泥破解程度上升越明显。但本试验的污泥流量峰值为12 L/h,此时流速为0.061 m/s,对应的 $Re < 500$,保证了污泥流态为层流,故污泥质点间的摩擦力对微生物结构和生物活性的影响可以忽略。

2.4 电磁波能量密度对污泥生物活性的影响

为了便于分析,以能量密度对不同工况下的电磁波加载能量强度进行表征,得到3组单因素试验时电磁波能量密度对污泥生物活性的影响,如图6所示。在只改变电磁波加载功率时,脱氢酶活性随着能量密度的增加而先升后降,加载低能量密度电磁波可以刺激污泥的生物活性,当能量密度为50 J/mL时,生物体被激活,脱氢酶活性达到峰值;当能量密度为50~150 J/mL时,脱氢酶活性显著下降,超过150 J/mL后,生物活性下降速度又明显变缓。对比图6与图2和图4可知,加载功率、加载时间与能量密度呈正相关,对污泥生物活性的影响也表现出同样的规律,当电磁波加载能量密度大于300 J/mL后,污泥脱氢酶活性几乎丧失。对比图6(c)和图5可以看出,在只改变污泥流量时,能量密度对污泥生

物活性的影响与污泥流量的影响规律有所不同,随着污泥流量的增加,能量密度变小,污泥脱氢酶活性降幅减小。

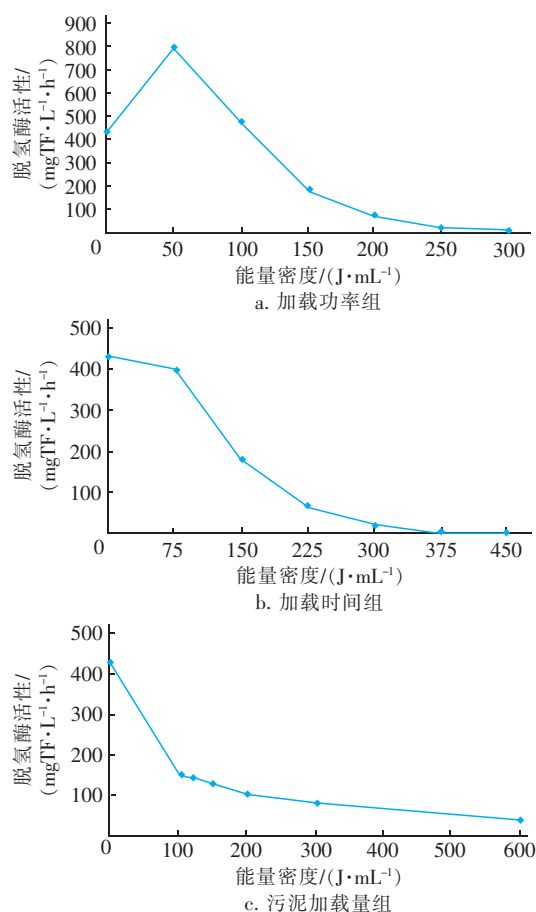


图6 电磁波能量密度对脱氢酶活性的影响

Fig. 6 Effect of electromagnetic energy density on activity of dehydrogenase

总体来说,污泥的脱氢酶活性随着电磁波加载能量密度的增加而降低,在电磁波能量密度为50~150 J/mL 范围内变化明显,这为电磁波加载污泥对其生物活性进行调控提供了依据。

2.5 相关性分析与模型建立

电磁波加载功率、加载时间、污泥流量都是影响污泥脱氢酶活性的重要因素,因此运用 SPSS 软件考察这些指标之间的相关性,得到三者之间的 Pearson 相关性系数,见表1。可以看出,3个因素与脱氢酶活性的 Pearson 相关性系数均大于0.8,验证了这3个加载条件都是重要的影响因素;脱氢酶活性与电磁波加载功率、加载时间呈显著负相关,与污泥流量呈显著正相关,且影响程度大小顺序为:污泥流量 > 加载功率 > 加载时间。

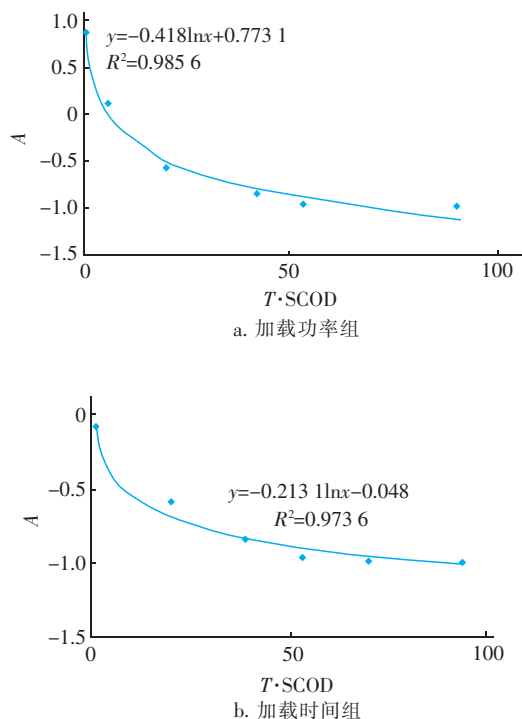
表1 3个加载因素之间的 Pearson 相关性系数

Tab. 1 Pearson correlation coefficient among three loading factors

项 目	$P_{\text{活性}}$	$P_{\text{温度}}$	P_{SCOD}	$P_{\text{活性-温度}}$	$P_{\text{活性-SCOD}}$
加载功率	-0.918	0.981	0.989	-0.906	-0.927
加载时间	-0.881	0.976	0.935	-0.908	-0.989
污泥流量	0.985	-0.982	-0.979	-0.954	-0.969

脱氢酶活性与温度、SCOD 均具有很强的负相关性,说明加载电磁波过程中,污泥温度升高和生物体结构的破坏是致使生物体失活的共同影响因素;其中,污泥上清液 SCOD 对脱氢酶活性的影响大于温度对其的影响,这是由于污泥生物体结构破坏是在电磁波的热效应和非热效应共同作用下发生的,故污泥上清液 SCOD 变化同时包含了电磁波的两种作用机制;而 SCOD 对脱氢酶活性的影响效果比温度更为显著,也说明了电磁波加载导致的生物体结构破坏是污泥中生物失活的最重要原因。

加载电磁波时,温度和生物体结构变化均对污泥生物活性影响显著,故考虑 SCOD 和温度为响应结果的自变量建立数学模型,进行污泥脱氢酶活性的变化预测。根据电磁波加载功率组、加载时间组和污泥流量组试验数据,利用 Origin8.0,以 $T \cdot \text{SCOD}$ 为横坐标、脱氢酶活性 A 为纵坐标作图,结果见图7(实测数据点),其中变量值均以原污泥特征值为基准,即以检测指标的相对变化值为变量值。



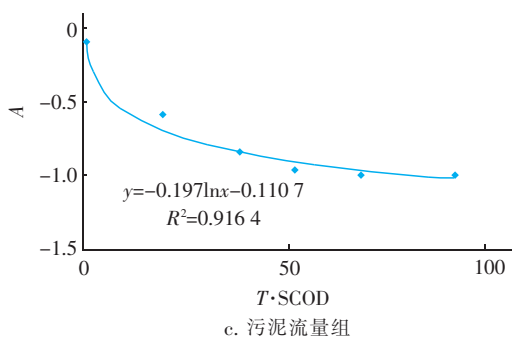


图7 模型拟合结果

Fig. 7 Fitted results of model

通过实测数据点在图中走向趋势,污泥脱氢酶活性与温度和 SCOD 数学模型选择如下函数形式(K 和 C 为无量纲经验常数):

$$A = K \cdot \ln(T \cdot \text{SCOD}) + C \quad (1)$$

以公式(1)为拟合方程,利用电磁波加载功率、加载时间、污泥流量3组试验数据,根据最小二乘法的原理对其进行非线性拟合,求得 K 和 C 。经分析,拟合曲线的相关度 R^2 值均在0.9以上,说明该数学模型能较好地反映电磁波加载下,污泥脱氢酶活性与温度和 SCOD 之间的关系,可用于表征加载电磁波对污泥脱氢酶活性的影响。该模型考虑了电磁波加载过程中污泥胞内物质的溶出效果(SCOD)和电磁波辐射产生的热效应(T),并以两者为变量预测污泥活性的变化,为电磁波加载回流污泥以改变工艺运行中的生物种群结构,达到污泥过程减量提供了一定的依据。

3 结论

① 电磁波加载功率为100 W时,SCOD溶出增多,但污泥脱氢酶活性反而达到峰值即795.76 mgTF/(L·h),较原泥提高了85.38%;加载功率为100~600 W、加载时间为25~150 s时,温度和 SCOD 不断增加,污泥脱氢酶活性呈下降趋势;污泥流量为2 L/h时,污泥脱氢酶活性迅速降为最低值即36.89 mgTF/(L·h),较原泥降低了91.42%,之后随污泥流量的增加,污泥脱氢酶活性逐渐上升。

② 污泥的脱氢酶活性随电磁波加载能量密度的增加而降低,在电磁波能量密度为50~150 J/mL范围内变化明显。

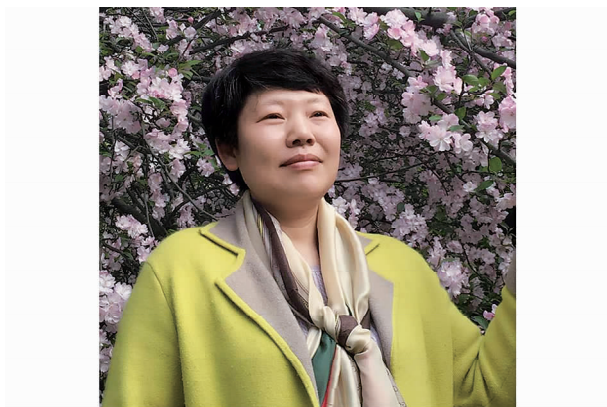
③ 电磁波加载功率、加载时间、污泥流量对脱氢酶活性的影响均较显著,影响程度顺序为:污泥流量>加载功率>加载时间;污泥脱氢酶活性与温度、

SCOD 的溶出均呈显著负相关,三者之间的关系可表达为: $A = K \cdot \ln(T \cdot \text{SCOD}) + C$ 。

参考文献:

- [1] Woo I S, Rhee I K, Park H D, et al. Differential damage in bacterial cells by microwave radiation on the basis of cell wall structure[J]. Appl Environ Microbiol, 2000, 66(5): 2243-2247.
- [2] Eskicioglu C, Droste R L, Kennedy K J, et al. Performance of anaerobic waste activated sludge digesters after microwave pretreatment[J]. Water Environ Res, 2007, 79(11): 2265-2273.
- [3] 胡坚. 寄生霉菌的微波效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
Hu Jian. Effect of Microwave on *Aspergillus Parasiticus* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009 (in Chinese).
- [4] 田禹, 方琳, 黄君礼, 等. 微波辐射预处理对污泥结构及脱水性能的影响[J]. 中国环境科学, 2006, 26(4): 459-463.
Tian Yu, Fang Lin, Huang Junli, et al. Influence of microwave pretreatment on activated sludge structure and dewaterability[J]. China Environmental Science, 2006, 26(4): 459-463 (in Chinese).
- [5] 周翠红, 常俊英, 陈家庆, 等. 微波对污水污泥脱水特性及形态影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 135-139.
Zhou Cuihong, Chang Junying, Chen Jiaqing, et al. Impacts of microwave on dewater ability and morphological feature of sewage sludge[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(1): 135-139 (in Chinese).
- [6] 王亚伟, 肖庆聪, 阎鸿, 等. 基于微波预处理的源头污泥减量研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(15): 19-23.
Wang Yawei, Xiao Qingcong, Yan Hong, et al. Source sludge reduction by conventional activated sludge process combined with microwave pretreatment[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(15): 19-23 (in Chinese).
- [7] 王一娜. 微波诱导实现污泥减量的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2010.
Wang Yina. Research on Sewage Sludge Reduction Technology by Microwave Induced Process[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2010 (in Chinese).
- [8] 孙德栋, 刘佳, 马春, 等. 微波辐照与碱联合应用实现剩余污泥减量的实验研究[J]. 大连工业大学学报,

- 2009, 28(3):195-199.
- Sun Dedong, Liu Jia, Ma Chun, *et al.* Reduction of sludge by microwave irradiation and alkali treatment[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2009, 28(3): 195-199 (in Chinese).
- [9] Wang Y W, Xiao Q C, Liu J B, *et al.* Pilot-scale study of sludge pretreatment by microwave and sludge reduction based on lysis-cryptic growth[J]. Bioresour Technol, 2015, 190:140-147.
- [10] Hong S M, Park J K, Lee Y O, *et al.* Mechanisms of microwave irradiation involved in the destruction of fecal coliforms from biosolids[J]. Water Res, 2004, 38:1615-1625.
- [11] Wang Y W, Wei Y S, Liu J X, *et al.* Effect of H_2O_2 dosing strategy on sludge pretreatment by microwave- H_2O_2 advanced oxidation process[J]. J Hazard Mater, 2009, 169:680-684.
- [12] 桑稳姣, 方笑笑, 田中凯, 等. 污泥加载量对连续流电磁波污泥脱水的影响[J]. 中国给水排水, 2014, 30(1):26-29.
- Sang Wenjiao, Fang Xiaoxiao, Tian Zhongkai, *et al.* Effect of sludge loading on continuous flow dewatering with electromagnetic wave[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(1):26-29 (in Chinese).
- [13] 桑稳姣, 方笑笑, 龚雅君, 等. 连续流 2 450 MHz 电磁波剩余污泥脱水与溶出效果研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8):2024-2029.
- Sang Wenjiao, Fang Xiaoxiao, Gong Yajun, *et al.* Study on dewater ability and solubilization of intracellular substances during sludge dewatered by continuous inflow with 2 450 MHz electromagnetic wave[J]. China Environmental Science, 2014, 34(8):2024-2029 (in Chinese).
- [14] 周恢, 左永生, 赵怀颖, 等. MBR 中污泥脱氢酶活性测定方法的改进[J]. 中国环保产业, 2006, (12):31-33.
- Zhou Hui, Zuo Yongsheng, Zhao Huaiying, *et al.* Improvement of determination on sludge dehydrogenase activity in MBR[J]. China Environmental Protection Industry, 2006, (12):31-33 (in Chinese).
- [15] 谢敏, 李好, 刘小波, 等. 微波调质对剩余污泥结构及其脱水性能的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8):4457-4461.
- Xie Min, Li Hao, Liu Xiaobo, *et al.* Effects of microwave conditioning on structure and dewaterability of sludge flocs[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(8):4457-4461 (in Chinese).
- [16] Qiang Y, Heng Y L, Zhong L, *et al.* Physical and chemical properties of waste-activated sludge after microwave treatment[J]. Water Res, 2010, 44(9):2841-2849.
- [17] 任伯帜, 侯保林, 陈文文, 等. 微波辐射对污水处理厂动态流活性污泥性能的影响研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(6):1624-1628.
- Ren Bozhi, Hou Baolin, Chen Wenwen, *et al.* Impact on properties of the sewage treatment plant dynamic flow activated sludge by microwave radiation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(6):1624-1628 (in Chinese).
- [18] 罗海健, 付长亮, 宁寻安, 等. 微波预处理对制革污泥絮凝脱水性能的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(5):1933-1938.
- Luo Haijian, Fu Changliang, Ning Xunan, *et al.* Influence of microwave pretreatment on tannery sludge flocculating and dewatering performances[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(5):1933-1938 (in Chinese).
- [19] 任伯帜, 侯保林, 陈文文, 等. 不同流态下微波辐射对污水污泥性质的影响研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7):1907-1911.
- Ren Bozhi, Hou Baolin, Chen Wenwen, *et al.* Effect of microwave radiation treatment on sewage sludge under different flow patterns[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(7):1907-1911 (in Chinese).



作者简介:桑稳姣(1974-),女,湖北公安人,工学博士,副教授,主要从事水污染物控制和污泥减量领域的教学和研究工作。

E-mail: whlgdxswj@126.com

收稿日期:2018-05-11