

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.01.011

电磁波加载内回流硝化液的A/A/O系统污泥减量研究

桑稳姣, 汪晨, 贾丹妮, 李强, 卢伟, 曹诚, 李翠华
(武汉理工大学建筑与土木工程学院, 湖北武汉430070)

摘要: 将电磁波加载于A/A/O系统的内回流硝化液,在分析溶胞率与内回流硝化液特性变化关系的基础上,探析系统的污泥减量提升效果及功能菌属的分布特征。结果表明,将电磁波加载于内回流硝化液可显著提升A/A/O系统的污泥减量效果,功能菌属中慢性生长细菌、水解细菌、发酵细菌和捕食细菌的总相对丰度增加。在电磁波加载功率为100 W、加载时间为75 s、内回流硝化液加载比例为10%的条件下,系统污泥表观产率降低了15.68%,厌氧池、缺氧池和好氧池的功能菌属总相对丰度分别增加了19.51%、20.59%、31.55%;而当电磁波加载功率增至400 W时,系统污泥表观产率降低了43.14%,厌氧池、缺氧池和好氧池的功能菌属总相对丰度分别增加了18.34%、26.30%、33.91%。

关键词: 污泥减量; 电磁波加载; 内回流硝化液; 污泥表观产率; 溶胞率; 菌属丰度

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2024)01-0068-08

Sludge Reduction in A/A/O System with Internal Reflux Nitrification Liquid Treated by Electromagnetic Wave

SANG Wen-jiao, WANG Chen, JIA Dan-ni, LI Qiang, LU Wei, CAO Cheng,
LI Cui-hua

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Electromagnetic wave was employed for the treatment of internal reflux nitrification liquid in A/A/O system to obtain better sludge reduction performance. After establishing the relationship between the cell lysis rate and the characteristics of the internal reflux nitrification liquid, electromagnetic wave was applied to treat the internal reflux nitrification liquid of an A/A/O system, and the improved performance of sludge reduction and the distribution characteristics of functional bacteria in the system were analyzed. The internal reflux nitrification liquid treated by electromagnetic wave significantly improved the sludge reduction performance of the system. The total relative abundance of functional bacteria such as chronic growing bacteria, hydrolytic bacteria, fermenting bacteria and predatory bacteria increased. Under the following operating conditions: power of electromagnetic wave was 100 W, treatment time was 75 s, and proportion of the treated internal reflux nitrification liquid was 10%, the apparent sludge yield decreased by 15.68%, and the total relative abundance of functional

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108360)

通信作者: 桑稳姣 E-mail: whlgdxswj@126.com

bacteria in anaerobic, anoxic and aerobic tanks increased by 19.51%, 20.59% and 31.55%, respectively. Under the same operating conditions except the power of electromagnetic wave was increased to 400 W, the apparent sludge yield decreased by 43.14%, and the total relative abundance of functional bacteria in anaerobic, anoxic and aerobic tanks increased by 18.34%, 26.30% and 33.91%, respectively.

Key words: sludge reduction; electromagnetic wave treatment; internal reflux nitrification liquid; apparent sludge yield; cell lysis rate; abundance of bacteria

电磁波作用于污泥时具有溶出效应和生物效应,是一项发展前景良好的处理技术^[1]。田禹等^[2]发现电磁波可破坏污泥絮体结构,使大量可生物降解有机物释放至液相中;剩余污泥经过电磁波预处理后回流至污水生物处理系统,污泥中溶出的有机物再次被细菌代谢,可在源头实现污泥减量。王亚炜等^[3]在CAS系统引入电磁波预处理单元后,污泥产量由32.20~54.12 kg/d减少到21.96 kg/d,污泥减量率达到了29.1%~40.9%;王一娜^[4]将微波诱导氧化预处理与SBR工艺结合,污泥溶解率可达到28.9%。Sang等^[5]研究表明,当电磁波作用于A/A/O系统的回流污泥时,系统的污泥减量效果可提升近33.1%。Zhao等^[6]研究发现,电磁波作用于污泥时,会使其微生物细胞DNA、蛋白质、酶的组成结构发生变化,导致生物酶活性改变,同时引起微生物群落结构和代谢过程的变化。可以预见,在A/A/O系统中,将电磁波加载于内回流硝化液,利用其溶出效应和生物效应也会对污泥产率产生影响,但相关报道较少。鉴于此,笔者采用电磁波加载A/A/O系统的内回流硝化液,根据溶胞率的变化探求系统的污泥减量效果和微生物群落结构的变化。

1 材料与方法

1.1 试验用水

试验进水采用人工模拟废水,碳源由淀粉、葡萄糖、CH₃COONa提供,氮源由NH₄Cl提供,磷源由KH₂PO₄提供,COD、TN、TP浓度分别为200~250、35~40、3.5~4.0 mg/L,pH为6~8,CaCl₂为30 mg/L,MgSO₄·7H₂O为27 mg/L,微量元素为1 mL/L。

1.2 试验装置

试验装置见图1。A/A/O系统的处理水量为5 L/h,主反应区有效容积为65 L,其中厌氧池、缺氧池、好氧池有效容积分别为10、15、40 L,水力停留时间分别为2、3、8 h;二沉池有效容积为30 L。试验温度控制在25℃左右,好氧池的DO浓度控制在3.5

mg/L左右。污泥回流比设为70%、硝化液回流比设为250%,污泥停留时间设为15 d。系统稳定运行30 d后,在硝化液回流管上增设电磁波加载装置的支管,以便调控回流硝化液的加载比例。电磁波加载方式为连续流模式,加载频率为2 450 MHz。

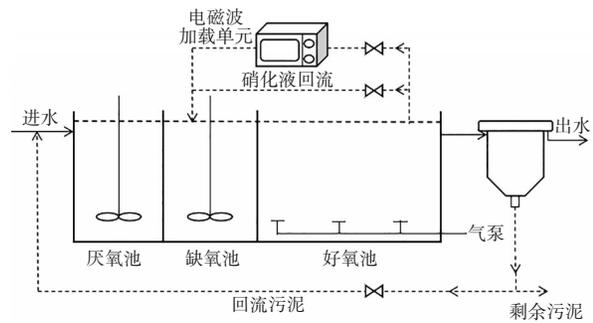


图1 试验装置

Fig.1 Schematic diagram of test equipment

1.3 泥源特征

接种污泥取自武汉市沙湖污水处理厂的回流污泥,原泥性质如下:MLSS和MLVSS分别为5 621、3 372 mg/L,温度为23.5℃,脱氢酶(DHA)活性为15.35 mgTF/(gMLVSS·h),比耗氧速率(SOUR)为4.50 mgO₂/(gMLVSS·h)。

1.4 试验方法

电磁波加载内回流硝化液的预试验:在电磁波加载时间为75 s^[7]、加载功率为100~600 W的条件下,研究溶胞率对硝化液特性的影响,了解硝化液的溶出效应和生物效应。试验结果显示,当电磁波加载功率分别为100、200、300、400、500、600 W时,溶胞率分别为2.49%、3.89%、8.17%、11.89%、13.15%、14.17%。

电磁波加载内回流硝化液的试验:在工况I(未加载)、II(加载功率P=100 W、加载时间T=75 s、硝化液加载比例L=10%)、III(P=400 W、T=75 s、L=10%)条件下,研究电磁波加载内回流硝化液对系统运行效果的影响,探求污泥减量效果和影响机制。

1.5 分析项目与方法

内回流硝化液上清液的溶解性COD(SCOD)、总溶解性氮(TDN)、总溶解性磷(TDP)浓度均采用国家标准方法测定。活性污泥的DHA活性采用2,3,5-氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法测定。以牛血清白蛋白为标样,采用Folin-酚试剂法测定胞外聚合物(EPS)中的蛋白质含量;以葡萄糖为标样,采用蒽酮-硫酸法测定多糖含量。

SOUR的计算方法如下:

$$\text{SOUR} = \frac{\text{DO}_0 - \text{DO}_t}{t \times \text{MLVSS}} \quad (1)$$

式中: DO_0 、 DO_t 分别为测定初始和结束时锥形瓶内的DO浓度,mg/L; t 为测定时间,h;MLVSS为污泥浓度,g/L。

污泥溶胞率(DD)的计算公式如下:

$$\text{DD} = \frac{\text{SCOD}_L - \text{SCOD}_0}{\text{TCOD}_0 - \text{SCOD}_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: SCOD_0 、 SCOD_L 分别为电磁波加载前、后内回流硝化液上清液的SCOD浓度,mg/L; TCOD_0 为电磁波加载前内回流硝化液的总COD浓度,mg/L。

采用污泥表观产率(Y_{obs})表征系统的污泥减量效果,计算公式如下:

$$Y_{\text{obs}} = \frac{\sum (X_i - X_1) \times V_r + \sum X_{wi} \times V_{wi}}{\sum (\text{DPC}_{\text{COD}i} - S_{ei} \times Q_{ei})} \quad (3)$$

式中: Y_{obs} 为污泥表观产率,kgMLSS/kgCOD; X_1 、 X_i 分别为第1天和第*i*天反应器主反应区的污泥浓度,kg/L; V_r 为反应器主反应区的有效容积,本研究中为65 L; X_{wi} 为第*i*天时反应器排出的剩余污泥浓度,kg/L; V_{wi} 为第*i*天时反应器排出的剩余污泥体积,L; $\text{DPC}_{\text{COD}i}$ 为第*i*天时反应器的进水COD总量,kg/d; S_{ei} 为第*i*天时反应器的出水COD浓度,kg/L; Q_{ei} 为第*i*天时反应器的出水流量,本研究中为120 L/d。

1.6 高通量测序

取A/A/O系统中未加载电磁波时的污泥样品A、 $P=100\text{ W}$ ($T=75\text{ s}$ 、 $L=10\%$)时的污泥样品A1和 $P=400\text{ W}$ ($T=75\text{ s}$ 、 $L=10\%$)时的污泥样品A2,在Illumina NovaSeq测序平台(派森诺生物,上海)进行测序。

利用QIIME2软件,根据97%的序列相似度将DNA序列进行归并和OTU划分;然后将抽平深度设为最低样本序列量的95%进行抽平处理;最后采用classify-sklearn算法将OTU代表序列与Silva数据库对比,进行物种注释,得到每个OTU的分类学信息。

2 结果与讨论

2.1 电磁波加载对内回流硝化液特性的影响

电磁波加载内回流硝化液时,污泥絮体和微生物细胞发生裂解,因为溶出效应,有机物释放进入硝化液的液相,引起硝化液物化性质的改变;同时,因为生物效应,微生物的生物酶活性发生变化,进而影响微生物群落结构。当电磁波加载时间为75 s、加载功率为100~600 W时内回流硝化液的特性指标变化见图2。可知,与未加载电磁波时相比,内回流硝化液的SCOD、TDN、TDP、MLVSS、温度、SOUR、DHA活性等均发生了显著变化。当电磁波加载功率为100 W时,溶胞率为2.49%,内回流硝化液的SCOD、TDN、TDP、温度、SOUR、DHA活性分别由未加载时的(40.77±2.43) mg/L、(14.57±0.45) mg/L、(0.36±0.11) mg/L、(23.0±0.8) °C、(12.56±0.49) mgO₂/(gMLVSS·h)、(35.59±2.82) mgTF/(gMLVSS·h)增加到了(88.65±3.54) mg/L、(18.84±0.51) mg/L、(1.52±0.23) mg/L、(34.3±0.7) °C、(15.46±2.01) mgO₂/(gMLVSS·h)、(54.99±3.36) mgTF/(gMLVSS·h),而内回流硝化液的MLVSS则由未加载时的(2494±38) mg/L下降到了(2186±31) mg/L。

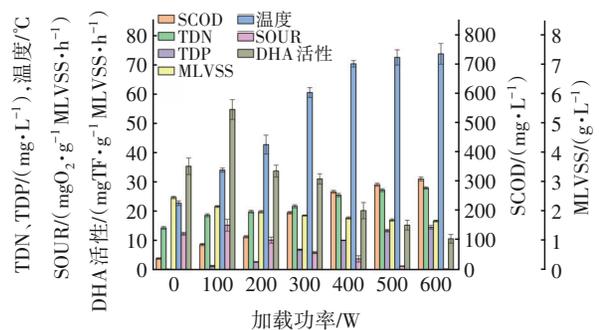


图2 电磁波加载条件下内回流硝化液的特性指标变化

Fig.2 Change of internal reflux nitrification liquid characteristics under electromagnetic wave loading

2.1.1 电磁波加载条件下硝化液的溶出效应

在电磁波加载时间为75 s、加载功率为100~600 W的条件下,电磁波加载对硝化液SCOD、TDN、TDP、MLVSS和溶胞率的影响见图3。可以看出,加载电磁波促进了硝化液上清液中SCOD、TDN、TDP浓度的增加。当电磁波加载功率为100 W时,溶胞率为2.49%,此时硝化液接收的电磁能量较低,溶出效应较弱,上清液的SCOD浓度由未加载时的

(40.77±2.43) mg/L 升至(88.65±3.54) mg/L;当电磁波加载功率增至600 W时,溶胞率达到14.17%,上清液的SCOD浓度迅速达到(312.85±6.85) mg/L。同时,当溶胞率由2.49%增加到14.17%时,上清液的TDN和TDP浓度分别由(18.84±0.51)、(1.52±0.23) mg/L增加到(28.19±0.37)、(14.81±0.63) mg/L。另外,硝化液的MLVSS浓度随着溶胞率的增加呈下降趋势,当溶胞率分别为2.49%、3.89%、8.17%(对应的电磁波加载功率分别为100、200、300 W)时,MLVSS分别为(2186±31)、(2004±40)、(1880±19) mg/L,而当溶胞率继续增加到11.89%、13.15%、14.17%(对应的电磁波加载功率分别为400、500、600 W)时,MLVSS下降速度变缓,分别为(1794±40)、(1724±42)、(1690±30) mg/L。

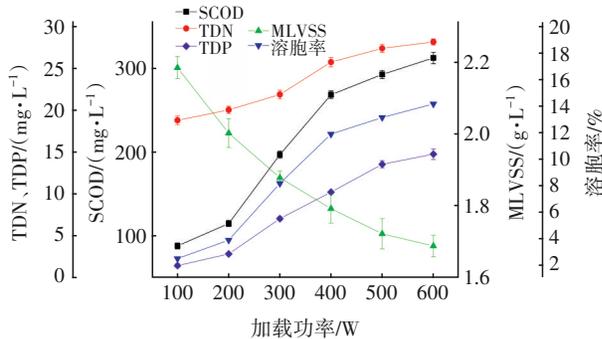


图3 电磁波加载对内回流硝化液 MLVSS、TDN、TDP、SCOD 和溶胞率的影响

Fig.3 Effect of electromagnetic wave loading on MLVSS, TDN, TDP, SCOD and cell lysis rate of internal reflux nitrification liquid

为进一步研究电磁波加载条件下溶胞率变化对硝化液溶出效应的影响,将溶胞率和上清液的TDN、TDP、MLVSS进行相关性分析,分别得到如下线性回归方程: $y=0.7925x+16.6075$, $R^2=0.9754$; $y=1.1035x-1.5143$, $R^2=0.9812$; $y=-37.0778x+2211.8833$, $R^2=0.9304$ 。可知,溶胞率和TDN、TDP均呈正相关关系,且具有较高的相关性。这是因为随着溶胞率的增加,硝化液中微生物细胞壁和细胞膜破裂,细胞内和絮体周围EPS中的蛋白质等含氮物质,以及多糖和核酸等含磷物质得到释放。溶胞率和MLVSS呈负相关关系,这可能是由于在电磁波加载下,硝化液发生崩解,部分有机物水解,随着溶胞率的增加,硝化液固相中的有机物含量减少,引起MLVSS含量的降低^[8]。

2.1.2 电磁波加载条件下硝化液的生物效应

在电磁波加载时间为75 s、加载功率为100~600 W条件下,电磁波加载对硝化液温度、SOUR、DHA活性和溶胞率的影响见图4。将溶胞率和温度、SOUR、DHA活性进行相关性分析,分别得到如下线性回归方程: $y=3.3708x+29.0477$, $R^2=0.9727$; $y=-1.1337x+16.4516$, $R^2=0.9495$; $y=-3.0588x+55.2523$, $R^2=0.8857$ 。随着电磁波加载功率的增大,硝化液的温度呈上升趋势,溶胞率和温度具有很强的正相关性。当溶胞率分别为2.49%、3.89%、8.17%时,温度分别达到了(34.3±0.7)、(43.0±3.2)、(60.8±1.7) °C,增幅较大,说明产生了电磁波热效应^[9]。硝化液中存在大量永久偶极或诱导偶极性物质,例如水和有机物,随着溶胞率的增加,溶出的有机物质增多,极性分子之间发生强烈碰撞并产生大量热量,促进了硝化液温度的升高^[10];当溶胞率继续增加到11.89%、13.15%、14.17%时,温度分别升至(70.6±1.1)、(72.8±2.6)、(74.0±3.5) °C,升温增幅变小,出现了电磁波生物学窗口效应^[11]。溶胞率与SOUR、DHA活性均具有很强的负相关性,且SOUR和DHA活性表现出相似的变化规律:当溶胞率为2.49%时,SOUR和DHA活性相比未加载电磁波时均变大并达到最高值,分别为(15.46±2.01) mgO₂/(gMLVSS·h)、(54.99±3.36) mgTF/(gMLVSS·h);而当溶胞率继续增加时,硝化液的SOUR和DHA活性均持续降低,当溶胞率为11.89%时,两者分别下降至(3.97±1.09) mgO₂/(gMLVSS·h)、(20.46±2.79) mgTF/(gMLVSS·h);当溶胞率为14.17%时,两者均达到了最小值,分别为(0.36±0.19) mgO₂/(gMLVSS·h)、(10.83±1.48) mgTF/(gMLVSS·h)。究其原因,当溶胞率较低时,微生物细胞未被破坏,硝化液中的絮体结构较为松散,微生物与营养底物之间的传质阻力较低。一方面,溶出的有机物溶解于硝化液中,改善了微生物的营养条件,DHA活性增强;另一方面,氧气和养分的输送得到加强,SOUR上升。当溶胞率不断增加时,硝化液中的絮体结构被破坏,细胞膜因其具有选择渗透性的脂质双层结构而更易吸收电磁波,故而被严重破坏,最终导致细胞死亡^[12],此时硝化液内大量生物体失活,体内蛋白质变性,DHA活性出现降低,SOUR也因微生物活性受到强烈抑制而明显降低^[13]。

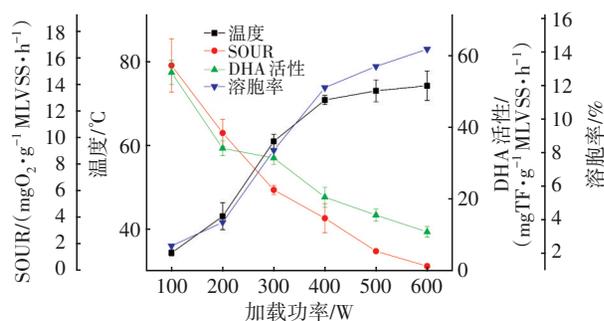


图4 电磁波加载对内回流硝化液温度、SOUR、DHA活性和溶胞率的影响

Fig.4 Effect of electromagnetic wave loading on temperature, SOUR, dehydrogenase activity and cell lysis rate of internal reflux nitrification liquid

2.2 污染物去除效果及污泥减量效果

2.2.1 污染物去除效果的变化

电磁波加载过程中, A/A/O系统出水水质稳定达标。在进水COD为(250.15±4.82) mg/L、TN为(35.05±0.49) mg/L、TP为(4.01±0.15) mg/L的条件下, 工况I(未加载)中COD、TN、TP的去除率分别为84.76%、54.09%、90.26%, 工况II中的去除率分别为87.25%、67.08%、83.46%, 工况III中的去除率分别为87.19%、67.14%、86.22%。与未加载电磁波时相比, 工况II和III中的COD去除率均有提升, TN去除率显著提高, TP去除率略有下降, 但出水TP浓度均达到了国家一级A排放标准。

2.2.2 污泥减量机制分析

当电磁波加载功率为100 W时, 硝化液的溶出效果并不明显, 但硝化液的生物活性增强了; 而当电磁波加载功率为400 W时, 硝化液的溶出效果显著, 但其生物活性被抑制, 且生物活性随着加载功率的增大进一步降低, 此时溶出效果的变化不明显。综合考虑硝化液的溶出效果和生物活性变化, 结合系统运行能耗, 分别在工况I、工况II、工况III条件下检测内回流硝化液中COD的溶出情况, 并计算3种工况的污泥表观产率, 结果显示, 污泥表观产率分别为0.51、0.43、0.29 kgMLSS/kgCOD, 工况II和III的污泥表观产率相比未加载系统分别减少了15.68%和43.14%, 这说明电磁波加载内回流硝化液可以促进A/A/O系统污泥减量效果的提升。从溶出效应角度分析, 电磁波加载内回流硝化液时, MLSS降低, 硝化液中微生物细胞内的C、N、P等物质被释放到液相中, 作为底物基质重新被微生物细

胞利用, 且溶出物质随着硝化液的回流, 重新返回A/A/O系统, 被系统微生物的生长代谢利用, 促进了系统溶胞-隐性生长, 且硝化液溶出效应越强, 系统的污泥减量效果越好。

进一步研究电磁波加载内回流硝化液对系统污泥活性的影响, 测定3种工况下厌氧池(An)、缺氧池(A)、好氧池(O)活性污泥的DHA活性, 结果见图5。可知, 电磁波加载内回流硝化液提升了系统中活性污泥的DHA活性。当电磁波加载功率为100 W时, 系统内活性污泥的DHA活性得到显著提升, 说明在此功率下, 硝化液的DHA活性得到显著提高, 其回流至系统后促进了系统整体DHA活性的提升。当电磁波加载功率为400 W时, 系统内活性污泥的DHA活性相比未加载时也有所提升。

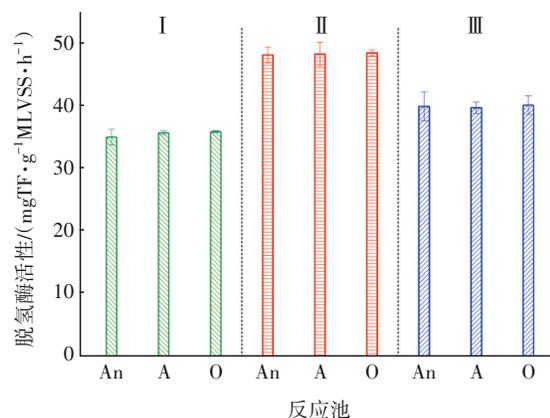


图5 电磁波加载内回流硝化液对污泥脱氢酶活性的影响
Fig.5 Effect of internal reflux nitrification liquid loaded by electromagnetic wave on dehydrogenase activity of sludge

在进行电磁波加载硝化液预试验时, 当加载功率为400 W时硝化液的DHA活性出现了降低, 但一定比例的硝化液被电磁波加载后回流至缺氧池时, 系统中活性污泥的DHA活性得到了提升, 分析认为, A/A/O活性污泥系统具有较高的稳定性, 当内回流硝化液的电磁波加载比例为10%时, 内回流硝化液释放出易生物降解的有机物质, 有利于微生物的生长代谢, 带来了系统生物活性的提升。而DHA会导致有机物和活性污泥氧化分解^[14], 其活性的提高有助于系统污泥减量。对比分析工况II和工况III的DHA活性以及污泥表观产率, 发现工况III中系统的DHA活性相对较低, 但污泥减量效果较好, 这说明DHA活性并不是影响系统污泥减量效果的主要因素, 电磁波加载硝化液的溶出效应和生物效应共

同影响着系统的污泥减量效果。

同时发现,活性污泥中EPS含量的变化也可反映系统污泥减量效果^[14]。电磁波加载前后A/A/O系统活性污泥中EPS含量的变化见图6。可知,电磁波加载内回流硝化液后,系统中各反应池的EPS含量均有所降低。EPS是活性污泥的主要组分,占污泥絮体的50%~90%,其含量的减少有利于污泥减量^[15]。当电磁波加载功率为100 W时,系统中EPS含量降低可能与污泥活性的升高有关,导致EPS被分解;当电磁波加载功率为400 W时,系统中EPS含量降低可能是因为硝化液吸收了大量的电磁能量而发生崩解,大量EPS被破坏。另外发现,电磁波加载使EPS中蛋白质的含量大幅降低,且蛋白质与多糖含量的比值减小,这也证明EPS发生了分解。李丹熠等^[16]的研究表明,当污泥温度超过70℃后,污泥中的松散附着型EPS和紧密结合型EPS含量均呈减小趋势,蛋白质、多糖及DNA含量也减小,与本研

究结果一致。

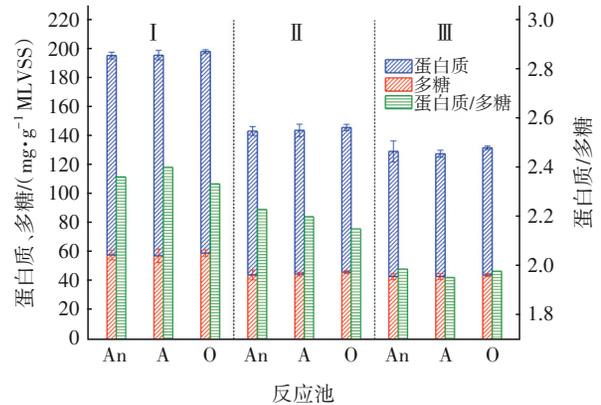


图6 电磁波加载内回流硝化液对系统中EPS含量的影响
Fig.6 Effect of internal reflux nitrification liquid loaded by electromagnetic wave on EPS content in system

2.2.3 污泥减量相关菌属分析

对于活性污泥系统,在污泥减量过程中发挥重要作用的菌属主要有慢性生长细菌、水解细菌、发酵细菌和捕食细菌^[17-18],它们的分布情况见表1。

表1 污泥减量功能菌属分布

Tab.1 Distribution of functional bacteria related to sludge reduction

项 目	相对丰度									
	工况 I			工况 II			工况 III			
	An	A	O	An	A	O	An	A	O	
慢性生长细菌	<i>Dechloromonas</i>	1.54	1.66	2.12	4.05	5.51	12.42	18.51	24.62	35.79
	<i>Denitratisoma</i>	0.02	0.02	0.01	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02
	<i>Sulfuritalea</i>	0.10	0.10	0.12	0.05	0.08	0.06	0.02	0.02	0.02
	<i>Thauera</i>	0.16	0.17	0.11	0.01	0.00	0.02	0.08	0.08	0.07
	总计	1.82	1.95	2.36	4.16	5.62	12.51	18.65	24.77	35.90
水解细菌	<i>Arcobacter</i>	3.33	3.02	1.53	1.64	0.65	0.65	3.13	2.30	1.16
	<i>Blastocatella</i>	0.00	0.01	0.01	0.02	0.05	0.05	0.07	0.08	0.12
	<i>Flavobacterium</i>	0.04	0.10	0.12	3.68	2.97	3.15	0.46	0.69	0.38
	<i>Plasticicumulans</i>	0.80	0.09	0.07	3.64	2.14	12.01	0.89	1.01	0.99
	<i>Rhizobacter</i>	0.18	0.03	0.12	0.90	1.08	1.04	0.15	0.25	0.16
	<i>Terrimonas</i>	0.11	0.08	0.05	0.61	0.52	0.29	0.26	0.26	0.18
	unclassified_Cytophagales	0.00	0.00	0.01	0.18	0.12	0.08	0.01	0.00	0.00
	unclassified_Xanthomonadaceae	0.34	0.21	0.31	3.42	3.46	2.68	2.99	3.23	2.28
总计	4.81	3.53	2.24	14.09	10.98	19.95	7.96	7.82	5.24	
发酵细菌	<i>Azospira</i>	2.80	2.58	2.16	3.81	4.05	2.50	1.53	1.77	1.20
	<i>Clostridium sensu stricto 1</i>	1.32	1.03	0.84	0.07	0.04	0.03	0.12	0.24	0.10
	<i>Haliangium</i>	1.26	1.55	1.96	8.97	10.33	6.06	3.11	3.04	1.57
	<i>Tolumonas</i>	1.72	1.27	0.89	0.54	0.29	0.19	0.61	0.61	0.40
	总计	7.11	6.43	5.85	13.39	14.71	8.78	5.37	5.66	3.27
捕食细菌	<i>Bdellovibrio</i>	0.20	0.19	0.32	0.16	0.14	0.08	0.06	0.08	0.05
	<i>Ignavibacterium</i>	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.01
	<i>Lysobacter</i>	0.00	0.00	0.00	0.40	0.33	0.21	0.26	0.12	0.23
	unclassified_Polyangiaceae	0.02	0.05	0.02	1.33	1.00	0.85	0.02	0.01	0.02
	总计	0.27	0.29	0.39	1.88	1.47	1.14	0.36	0.26	0.31

从微生物学角度分析,系统中不同反应池中各种慢性生长细菌的相对丰度变化规律并不相同,但总相对丰度沿工艺流程呈递增趋势,这有助于污泥产率的降低。水解细菌在电磁波加载后相对丰度增大,这主要是因为硝化液中有有机物发生水解,回流至A/A/O系统后,增强了水解细菌的生长和繁殖,这也进一步解释了系统中EPS含量的降低。当电磁波加载功率为100 W时,各反应池中的发酵细菌总相对丰度最高,此时A/A/O系统具有更有效的水解作用,但当加载功率增至400 W时,发酵细菌因其生长和代谢受到抑制而丰度降低。捕食细菌的富集可以促进溶胞-隐性生长过程^[19],在工况Ⅱ中其相对丰度较高,而在工况Ⅲ中其相对丰度较低,说明捕食细菌的变化不是影响系统污泥减量的主要原因。

综合分析这4种功能菌属总相对丰度的变化,可以发现当电磁波加载功率较低时,水解细菌和发酵细菌的丰度最高,占主导地位;当加载功率较高时,慢性生长细菌占主导地位。总体看来,加载功率越大,系统内功能菌属的总相对丰度越高(工况Ⅰ中An、A、O池分别为14.01%、12.20%、10.84%;工况Ⅱ中分别为33.52%、32.79%、42.39%;工况Ⅲ中分别为32.35%、38.50%、44.75%),说明电磁波加载内回流硝化液确实能有效影响A/A/O系统的污泥减量效果。

3 结论

① 电磁波加载A/A/O系统的内回流硝化液时,溶胞率的变化会影响硝化液的溶出效应和生物效应,从而影响系统的污泥减量效果。当电磁波加载功率为400 W、加载时间为75 s、内回流硝化液加载比例为10%时,系统的污泥减量效果可提升43.14%。

② 电磁波加载A/A/O系统内回流硝化液后,与系统污泥减量相关的功能菌属总相对丰度增大,有助于提升系统的污泥减量效果。

参考文献:

[1] 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).

[2] 田禹,方琳,黄君礼. 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. Influence of microwave pretreatment on activated sludge structure and dewaterability [J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(4): 459-463 (in Chinese).

[3] 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).

[4] 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 Sludge Reduction Induced by Microwave [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2010 (in Chinese).

[5] SANG W J, LI D, HE Y J, *et al.* Sludge reduction and pollutants removal in anaerobic-anoxic-oxic reactor with 2 450 MHz electromagnetic wave loading on returned sludge: performance and mechanism [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 147: 68-79.

[6] ZHAO Z H, YU S R, XU M J, *et al.* Effects of microwave on extracellular vesicles and microRNA in milk [J]. *Journal of Dairy Science*, 2018, 101(4): 2932-2940.

[7] 李栋. 电磁波加载内回流硝化液对A/A/O系统污泥减量与脱氮效果的影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.

LI Dong. Effects on Sludge Reduction and Nitrogen Removal of A/A/O System with Internal Recycle Nitrate Loaded by Electromagnetic Wave [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020 (in Chinese).

[8] 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).
- [9] GIL A, SILES J A, MARTÍN M A, *et al.* Effect of microwave pretreatment on semi-continuous anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Renewable Energy*, 2018, 115: 917-925.
- [10] TANG B, YU L F, HUANG S S, *et al.* Energy efficiency of pre-treating excess sewage sludge with microwave irradiation [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5092-5097.
- [11] 牛中奇, 侯建强, 王海彬, 等. 电磁波的生物学窗效应[J]. *中国生物医学工程学报*, 2003, 22(2): 126-132.
NIU Zhongqi, HOU Jianqiang, WANG Haibin, *et al.* The window bioeffects of electromagnetic waves [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2003, 22(2): 126-132 (in Chinese).
- [12] TYAGI V K, LO S L. Microwave irradiation: a sustainable way for sludge treatment and resource recovery [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 18: 288-305.
- [13] LI H, JIN Y Y, MAHAR R B, *et al.* Effects of ultrasonic disintegration on sludge microbial activity and dewaterability [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2/3): 1421-1426.
- [14] WANG J, CHON K, REN X H, *et al.* Effects of beneficial microorganisms on nutrient removal and excess sludge production in an anaerobic-anoxic/oxic (A²O) process for municipal wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 281: 90-98.
- [15] XU Y X, WANG H L, WANG Z H, *et al.* Hydrocyclone breakage of activated sludge to exploit internal carbon sources and simultaneously enhance microbial activity [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, 117: 651-659.
- [16] 李丹熠, 桑稳姣, 张倩, 等. 2 450 MHz电磁波污泥脱水过程中的温度效应[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(11): 4147-4152.
LI Danyi, SANG Wenjiao, ZHANG Qian, *et al.* Temperature effect of 2 450 MHz electromagnetic wave during sludge dewatering [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(11): 4147-4152 (in Chinese).
- [17] FERRENTINO R, LANGONE M, GANDOLFI I, *et al.* Shift in microbial community structure of anaerobic side-stream reactor in response to changes to anaerobic solid retention time and sludge interchange ratio [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 221: 588-597.
- [18] PANG H J, ZHOU Z, NIU T H, *et al.* Sludge reduction and microbial structures of aerobic, micro-aerobic and anaerobic side-stream reactor coupled membrane bioreactors [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 268: 36-44.
- [19] NIU T H, ZHOU Z, SHEN X L, *et al.* Effects of dissolved oxygen on performance and microbial community structure in a micro-aerobic hydrolysis sludge in situ reduction process [J]. *Water Research*, 2016, 90: 369-377.

作者简介:桑稳姣(1974-),女,湖北公安人,博士,副教授,主要从事水污染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:2021-09-02

修回日期:2022-01-05

(编辑:刘贵春)

尊法学法守法用法, 治水管水兴水护水