

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.11.004

上海城市污水中有机物捕获及优质碳源转化特征

杨 军¹, 占 晨^{1,2}, 李梓源^{1,2}, 李 彭², 郭 恰³, 何义亮²

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240; 3. 上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司, 上海 201112)

摘 要: 在城市污水处理普遍面临进水碳源不足、外加碳源投加量持续上升的背景下,从进水中捕获有机碳并产酸,已成为污水资源化利用的有效途径。通过探究城市污水可捕获及优质碳源转化特征,评价城市污水的产酸潜力。对上海4座典型污水处理厂(HQ、SDK、ZY、BLG)污水使用聚合氯化铁(PFC)进行混凝沉淀,并对原水及混凝后的水样进行分级分析,探究沉淀物的发酵产酸效果。结果表明,污水厂进水TCOD浓度在80.8~298.8 mg/L范围,平均浓度为 (148.1 ± 16.3) mg/L;城市污水中PCOD占主要部分,比例为 $(52.59 \pm 6.26)\%$ 。PFC对TCOD的平均捕获率为 $(46.86 \pm 2.84)\%$,其中颗粒态有机物捕获效果最好,使用PFC混凝能够有效捕获水中的有机物。将浓缩污泥的VSS调整至15 g/L后,4座污水厂的平均产酸总量(以COD计)依次为 $(2\,851.8 \pm 339.5)$ 、 $(2\,720.9 \pm 225.4)$ 、 $(2\,207.1 \pm 204.4)$ 和 $(2\,567.5 \pm 310.9)$ mg/L。PFC对溶解性磷的捕获效果较好,平均捕获率为69.6%;对溶解性氮的捕获效果有限,平均捕获率为17.1%。总之,上海市城市污水中的有机物以颗粒态为主,使用PFC可以有效截留其中的有机碳,且产酸效果良好,能为后续脱氮除磷过程提供优质碳源。

关键词: 城市污水; 有机碳捕获; 污泥发酵; 聚合氯化铁

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)11-0026-08

Characteristics of Organic Matter Recoverability and High-quality Carbon Source Conversion in Shanghai Municipal Wastewater

YANG Jun¹, ZHAN Chen^{1,2}, LI Ziyuan^{1,2}, LI Peng², GUO Qia³, HE Yiliang²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co. Ltd., Shanghai 201112, China)

Abstract: Against the backdrop of widespread influent carbon source shortage and continuously increasing external carbon source dosing in municipal wastewater treatment, capturing organic carbon from influent and converting it into volatile fatty acids (VFAs) has become an effective pathway for wastewater resource recovery. In this study, the capture potential and conversion characteristics of recoverable, high-quality carbon in municipal wastewater were investigated to evaluate its acidogenic potential. To this end, influent from four representative municipal wastewater treatment plants (HQ, SDK, ZY and BLG) in Shanghai was subjected to coagulation-sedimentation with polymeric ferric chloride

基金项目: 上海城投水务(集团)有限公司科研项目(KY.WB.23.001)

通信作者: 李彭 E-mail: lipeng2016@sjtu.edu.cn

(PFC). The raw and post-coagulation wastewater samples were then fractionated, and the acidogenic fermentation performance of the resulting precipitates was evaluated. The results showed that the influent total COD (TCOD) ranged from 80.8 mg/L to 298.8 mg/L across the four seasons, with an annual mean of (148.1 ± 16.3) mg/L; particulate COD (PCOD) constituted the major fraction, accounting for $(52.59 \pm 6.26)\%$. The average TCOD capture efficiency of PFC was $(46.86 \pm 2.84)\%$, with the best performance observed for particulate organic matter, indicating that PFC coagulation could effectively recover organic matter from municipal wastewater. The annual mean total acid production, expressed as COD, for the four plants were $(2\ 851.8 \pm 339.5)$ mg/L, $(2\ 720.9 \pm 225.4)$ mg/L, $(2\ 207.1 \pm 204.4)$ mg/L and $(2\ 567.5 \pm 310.9)$ mg/L, respectively. PFC also showed stable capture performance for nutrients, with average removal rates of 69.6% for phosphorus and 17.1% for nitrogen. In summary, particulate fractions dominate the organic carbon in municipal wastewater. PFC coagulation can effectively retain this influent organic carbon while achieving satisfactory acid production, and the resulting fermentation liquor can be used as a supplementary carbon source for biological nitrogen and phosphorus removal.

Keywords: municipal wastewater; organic carbon capture; sludge fermentation; polymeric ferric chloride

典型城市污水中的有机物主要由蛋白质、多糖、脂类及挥发性脂肪酸(VFAs)等组成,颗粒态、胶体态与溶解态有机物比例及可生化性差异显著^[1]。随着城镇化推进及用水结构的变化,进水中有机物的种类与形态愈加复杂。随着《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)及各地更严格排放标准的实施,城市污水处理厂面临更高的脱氮除磷压力^[2],而进水中脱氮除磷碳源不足已成为限制许多厂站进一步提高脱氮除磷效率的关键因素之一。因此,深入研究城市污水中有机物的分级特性,对实现碳源精准截留与资源化具有重要意义。

化学强化初沉(CEPT/CEPS)被认为是实现碳源精准截留的重要手段^[3]。通过投加铁盐、铝盐及高分子絮凝剂,可显著提高有机物和磷在初沉污泥中的富集率^[4-5],部分铁基CEPS工艺可将70%以上有机物转移至污泥相,为初沉污泥厌氧发酵回收VFAs提供高负荷底物^[6]。然而,现有CEPT/CEPS研究多聚焦于COD、TOC等总体去除率和能耗评价^[7-8],对城市污水中颗粒态、胶体态及不同分子质量溶解性有机碳的分级截留特征关注不足。传统无机混凝剂在去除颗粒态和胶体态有机物方面效果突出,但对分子质量低、亲水性强的溶解性有机物去除有限^[9]。已有研究表明,初沉污泥厌氧发酵产酸是污泥减量化与资源化的有效途径,所得VFAs可替代外加碳源用于强化脱氮除磷^[10-11]。然而,污水中的

有机碳在CEPT工艺中的可捕获性和可转化性有待进一步研究。因此,探究污水水质的特征变化,对评价CEPT处理工艺的可行性具有重要意义。

本文以上海4座典型城市污水处理厂的生活污水为研究对象,分析其颗粒态、胶体态和溶解态有机碳的分级特征,评估聚合氯化铁(PFC)和聚丙烯酰胺(PAM)联用对不同形态有机碳的截留效果,并针对溶解性有机物的组成变化做进一步检测分析。最后利用捕集的污泥进行厌氧发酵,考察VFAs产量及组分,讨论其用作A²O工艺碳源的可行性及对脱氮除磷的促进作用。

1 材料与方法

1.1 污水来源及水质

实验用水取自污水处理厂HQ、BLG、ZY、SDK(A²O工艺)经粗格栅及细格栅处理后的出水,每座污水厂每季度各取样一次,每次取水20 L,共16份水样,其水质均值如下:pH为 7.4 ± 0.2 ,总化学需氧量(TCOD)为 (148.1 ± 16.3) mg/L,溶解态化学需氧量(SCOD)为 (70.2 ± 6.3) mg/L, TN为 (25 ± 3.4) mg/L, TP为 (3.6 ± 1.4) mg/L,总固体(TS)为 $(1\ 022.3 \pm 55.7)$ mg/L。用于厌氧发酵的接种污泥取自实验室长期运行的厌氧消化反应器,使用前先沉降去除上清液并保留适量水分以维持污泥活性。

1.2 有机碳的混凝捕获与厌氧产酸特性

将污水倒进带有搅拌器的20 L混凝沉淀罐中,

加入20 mg/L的PFC并在100 r/min下搅拌2 min,进行有机碳的快速捕获浓缩。接着加入2 mg/L的PAM,并在25 r/min下搅拌15 min,进行有机碳的慢速助凝。上述药剂投加量及搅拌条件参考课题组前期研究确定^[12]。收集沉淀污泥作为浓缩碳源。污水中有机物的可捕获性由式(1)确定。

$$\eta_{\text{cap}} = M_{\text{cap}} / M_{\text{in}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η_{cap} 为有机物捕获率,其值越大说明对有机物的捕获能力越强,%; M_{cap} 为通过PFC混凝转移至初沉污泥中的有机物总量(以COD计),mg/L; M_{in} 为进水中有机物总量(以COD计),mg/L。

将收集到的浓缩污泥VSS调整至15 g/L,取300 mL装入500 mL蓝盖瓶,并加入10 mL厌氧污泥(来自实验室长期运行的厌氧反应器)和15 mmol/L的2-溴乙烷磺酸钠(BES,抑制产甲烷)。充氮气置换瓶内空气后密封,于35℃下厌氧培养9 d。污水中有机物的优质碳源转化潜力(η_{VFAs})采用发酵终点上清液中VFAs净增浓度(折算为COD)与进水TCOD之比来评估,该值越大说明产酸能力越强。

1.3 分析方法

1.3.1 常规指标测定

TS、VS采用重量法测定;COD用重铬酸钾滴定法测定;TP用钼酸铵分光光度法测定;TN采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;TOC采用总碳/氮分析仪测定;使用哈希DR6000测定254 nm处的吸光度,并计算比吸光度 SUVA_{254} ;VFAs采用气相色谱法测定。

1.3.2 有机碳物理分级

取180 mL经过0.45 μm 滤膜过滤后的水样,倒入1 ku超滤杯中,在0.2 MPa压力下用磁力搅拌器以350 r/min进行超滤,并将滤出液收集于烧杯中。待烧杯中溶液体积约为初始体积的1/6时,收集得到的150 mL滤出液即为低分子溶解性有机物(SM COD)。随后向超滤杯中加入150 mL超纯水并再次过滤,弃去滤出液,如此重复2次,最后将超滤杯中的残留溶液用超纯水补足至180 mL,作为胶体态有机物(CC OD)部分。颗粒态有机物(PC OD)浓度为TC OD浓度与SC OD浓度的差值,而SC OD包括CC OD和SM COD两部分^[13]。

1.3.3 有机碳化学分级

溶解性有机碳(DOC)的化学组成采用“色谱-有机碳/氮联用+树脂分级”的方法进行表征。首先

利用液相色谱-有机碳氮联用仪(LC-OCD-OND)测定水样中溶解性有机物(DOM)的分子质量分布及有机碳、有机氮含量。LC-OCD-OND系统由安捷伦高效液相色谱仪配二极管阵列检测器(DAD)、荧光检测器(FLD)、在线有机碳/有机氮检测器组成,色谱柱采用HW40s粒径排阻柱(20 mm×350 mm),流动相为1.5 g/L $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ +2.5 g/L KH_2PO_4 磷酸盐缓冲液,流速为1.0 mL/min,进样体积为500 μL ,在线检测254 nm处吸光度。

对DOC的化学组成进行分级^[14]。实验使用Amberlite XAD-8大孔树脂、Amberlite XAD-4大孔树脂、IRA-958阴离子交换树脂;玻璃层析柱的内径为1.5 cm,长为20 cm,带砂芯和聚四氟乙烯调节阀。采用树脂吸附分离方法,将污水中的溶解性有机物分离为憎水性碱性物质(HoB)、憎水中性物质(HoN)、强憎水酸性物质(HoA)、弱憎水酸性物质(WhoA)和荷电亲水性物质(HiN)5种组分。

1.3.4 荧光光谱扫描

根据模型化合物的荧光,荧光光谱(EEM)按照激发/发射波长($\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$)被划分为5个区域,即:酪氨酸类物质(I区), $\lambda_{\text{Ex}} < 250 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{Em}} < 330 \text{ nm}$;色氨酸类物质(II区), $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为200~250 nm/330~380 nm;富里酸类物质(III区), $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为200~250 nm/380~500 nm;微生物副产物(SMP)和蛋白质类物质(IV区), $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为250~400 nm/200~380 nm;腐殖质类物质(V区), $\lambda_{\text{Ex}}/\lambda_{\text{Em}}$ 为250~400 nm/380~500 nm。

2 结果与讨论

2.1 污水厂进水有机物组分

对污水厂经粗格栅及细格栅处理后出水中的TCOD、PCOD和SCOD按季度进行为期一年的检测。城市污水四季进水TCOD浓度范围为80.8~298.8 mg/L,平均浓度为(148.1±16.3) mg/L。如图1(a)所示,城市污水中PCOD占主要部分,占比为(52.59±6.26)%,使用无机混凝剂对进水有机物进行捕获能得到较好效果^[12]。其中冬季TCOD浓度显著提高,相比于其他季节提高了约52%。这是由于冬季居民用水量减少,进水TCOD整体升高,加上温度降低,污水管网中微生物降解能力下降,有机物降解速率降低,使得冬季TCOD浓度明显高于其他季节。如图1(b)所示,HQ污水厂进水COD平均浓度最高(181.9 mg/L),SDK污水厂第二(163.3 mg/L)。这

是因为 HQ 污水厂进水管网采用分流制,而对于合流制污水厂而言,由于雨季时大量的地表径流流入管网系统,进水 COD 被稀释,浓度降低^[15]。SDK 污水厂邻近上海宝钢集团,其进水主要为工业废水,周期性浓度变化较大,由于特殊时间节点的工业需求增高,冬季末期接收的工业废水浓度升高,使得 TCOD 增加。

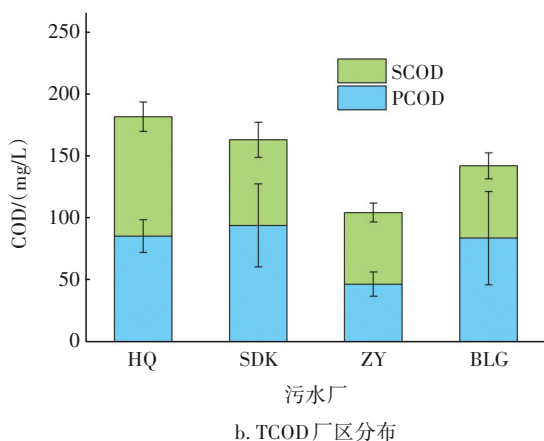
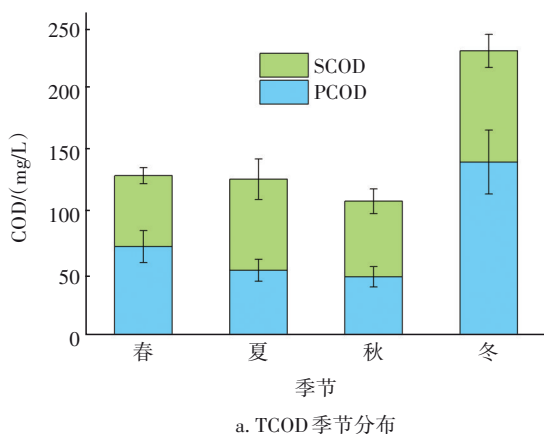


图1 4座污水厂平均TCOD分布

Fig.1 Average TCOD distribution at four WWTPs

2.2 PFC对进水中有机物的捕获效果

采用PFC对进水中的有机物进行捕获,结果见图2。PFC对进水TCOD具有较好的捕获效果,平均捕获率为 $(46.86 \pm 2.84)\%$ 。其中,冬季捕获率最高 (57.42%) ,而夏季最低 (39.70%) ,表现出与常规混凝相反的变化规律。这一现象可能与冬季进水中颗粒态有机物比例偏高、可溶性有机物含量相对较低有关。同时,高温条件下絮体稳定性降低,也可能导致捕获率下降。从对不同形态的COD捕获来看,PFC对PCOD的捕获效果最为显著,捕获率为 74.90% ;对CCOD的捕获率为 25.12% ,对SMCOD

的捕获率为 13.63% 。这表明PFC主要通过物理混凝和表面吸附去除颗粒态及大分子有机物,而对分子质量较小、极性较强的有机物作用有限。结合亲疏水组分的捕获特性,这种捕获效果的差异与有机物的微观结构和官能团密切相关。PFC水解产生的铁系絮体易与含有羧基($-\text{COOH}$)、羟基($-\text{OH}$)等含氧官能团的有机物发生配位络合或离子交换作用^[16]。富含此类活性官能团的颗粒态及部分胶体态有机物(如弱憎水性酸性物质),更容易通过“吸附-电中和”或“吸附-架桥”机制被高效网捕;而溶解性组分中具有高芳香度和 $\pi-\pi$ 共轭体系的强憎水性物质与铁离子的络合能力较弱,导致PFC对其捕获效果受限。总之,PFC在常规运行条件下可显著降低进水COD浓度,尤其对颗粒态组分具有较好的捕获效果^[13,17]。但其对溶解性及小分子有机物的捕获效果有限,且捕获效率受进水组分和温度等因素影响,为保证稳定的COD捕获效果,应在不同季节优化PFC投加量及混凝条件。

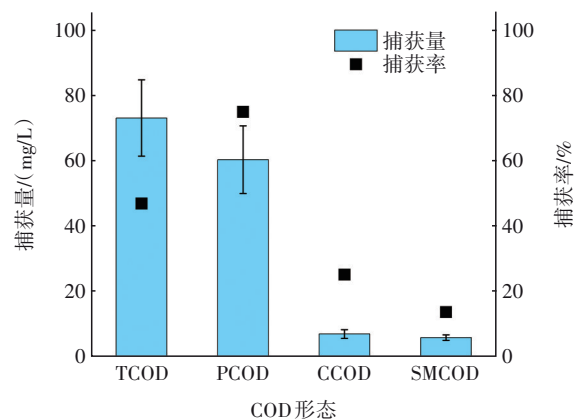


图2 PFC对城市污水中各形态COD的捕获效果

Fig.2 Capture performance of PFC for different COD fractions in municipal wastewater

2.3 溶解性有机物特性

为明确污水中溶解性有机物(DOM)的组分与捕获效果,通过LC-OCD-OND和大孔树脂对捕获前后水样的组分进行分级,并使用三维荧光光谱进一步表征其去除规律。PFC对DOM(以TOC计)的捕获特性及组分变化规律如图3所示。经PFC混凝处理后,各污水厂进水中的DOM浓度均有所降低,降幅约 19% ,说明PFC对污水中可溶性有机物的捕获效果有限。亲水性有机物平均减少 21% ,捕获效果略优于疏水性组分,说明PFC对极性较强、易形

成络合物的组分具有较高亲和性。这主要与PFC水解过程中生成的多核羟基络合物和Fe-O-Fe架桥结构有关,该结构可有效压缩双电层、降低胶体稳定性,从而促进有机物的失稳与凝聚^[18]。同时,Fe³⁺的高价特性有助于形成致密絮体,所以对亲水性带电有机分子表现出更强的吸附作用。

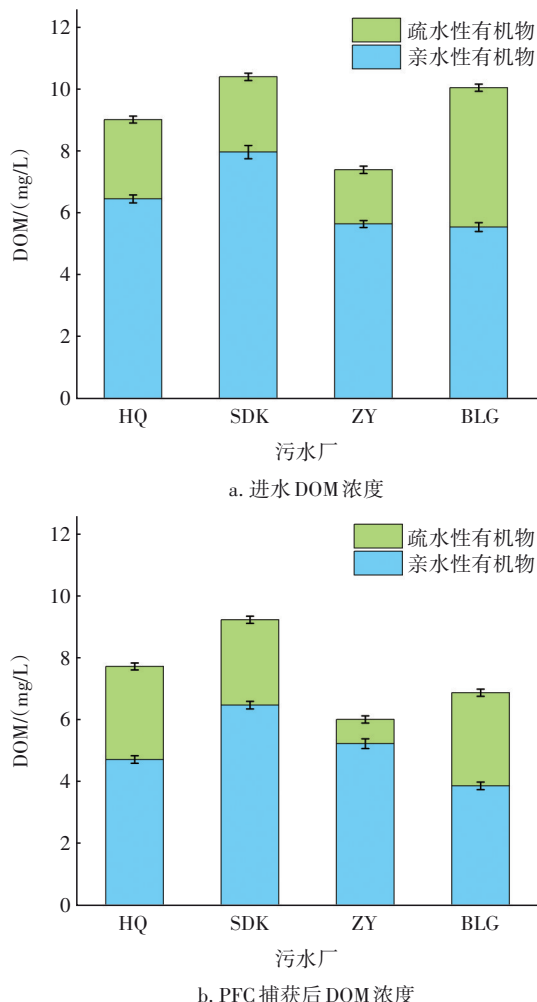


图3 城市污水中溶解性有机物浓度变化

Fig.3 Variation of dissolved organic matter concentration in municipal wastewater

使用LC-OCD-OND对捕获后水样进行组分分析,生物大分子、腐殖质、分子砌块、低分子质量有机酸、低分子质量中性物质剩余浓度分别为(0.515±0.028)、(1.225±0.097)、(0.860±0.061)、(0.203±0.041)、(2.035±0.145) mg/L,相应的捕获率为57.0%、5.9%、22.8%、-74.4%、25.9%。可见,对生物大分子和低分子质量中性物质的捕获率较高,而低分子质量有机酸浓度有所上升,但由于其在进水中的浓度较低,对溶解性有机物的组成影响

有限,这一现象可能是混凝过程中部分大分子或胶体裂解转化为小分子酸性物质所致。前者说明PFC对蛋白质、多糖等大分子有机物具有较强的捕获作用,其主要机理包括电荷中和与阳离子架桥^[19];后者则表明混凝过程中可能伴随DOM结构重组及降解反应。PFC水解产生的微酸性环境有可能促进大分子的断裂及小分子酸的生成。

使用大孔树脂对捕获后的水样进行组分分析,HoB、HoN、HoA、WhoA、HiN剩余浓度分别为(0.596±0.051)、(0.322±0.037)、(0.541±0.035)、(0.182±0.030)、(0.314±0.045) mg/L,相应的捕获率分别为20.9%、11.1%、3.6%、61.3%、40.7%。对WhoA和HiN的捕获效果显著,而HoA降幅较小,表明其结构稳定性较高。强憎水性酸性物质往往具有较高的芳香度与 π - π 共轭体系,从而削弱了其与Fe³⁺之间的络合或吸附作用。相比较而言,弱憎水性酸性物质通常含有羧基(-COOH)等含氧官能团,易与Fe³⁺形成配位络合物,并通过网捕或共沉淀等机制被有效去除^[20]。而荷电亲水性物质多为带负电的大分子或胶体,通过电荷中和与架桥作用易形成大絮体,随沉降被高效去除^[21]。

采用三维荧光光谱(EEM)对混凝前后的BLG水样进行分析,进一步揭示PFC对不同DOM组分的去除效果,结果如图4所示。

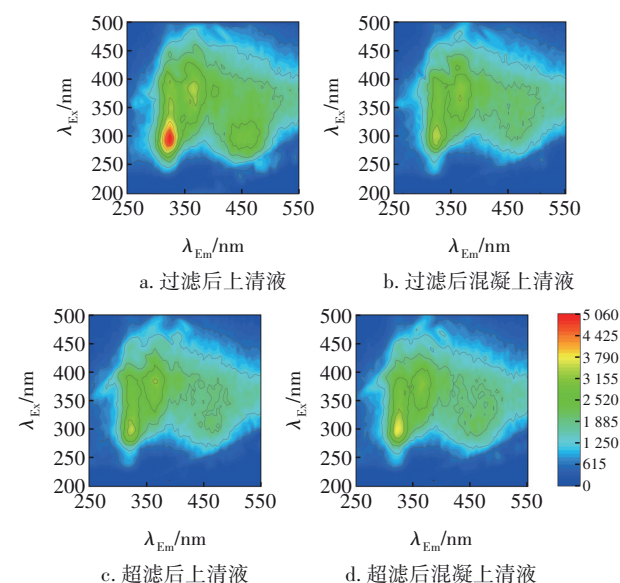


图4 BLG水样的三维荧光光谱

Fig.4 EEM spectra of water samples in BLG WWTP

由图4(a)可知,混凝前样品经0.45 μm 滤膜过滤后存在两个主要特征荧光峰,分别位于 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ 为

300 nm/325 nm(微生物代谢副产物及蛋白质类物质)和 375 nm/375 nm(腐殖酸类物质)处,说明过滤后水中含有较多可溶性蛋白质及腐殖酸类物质。过滤后的上清液经 PFC 混凝处理后,整体荧光强度明显降低,其中蛋白质类物质减弱效果明显,表明 PFC 混凝能同时减少水中蛋白质和腐殖酸类物质。

由图 4(c)可知,原水经 1 ku 超滤后,去除效果与过滤后混凝的效果相似,其中蛋白质类组分去除效果更好,表明超滤对高分子、胶体态有机物有良好截留作用,透过液中残留的主要为小分子蛋白质和腐殖酸类物质。超滤出水再经混凝处理后,腐殖酸类物质荧光强度进一步降低。由此可见,超滤截留与混凝吸附的协同作用,可以实现对水中不同分子质量和不同类型溶解性有机物的高效去除。

2.4 捕获有机物的可转化性

为探究捕获污泥中可生物降解有机物向快速可生物降解有机物的转化效果,对城市污水进行有机碳捕获浓缩后,调整 VSS 至 15 g/L 进行发酵产酸实验。结果表明,不同污水厂捕获污泥的产酸效果表现出明显的差异,HQ、SDK、ZY、BLG 浓缩污泥平均厌氧产酸量(以 COD 计)分别为(2 851.8±339.5)、(2 720.9±225.4)、(2 207.1±204.4)、(2 567.5±310.9) mg/L。总体来看,PFC 混凝捕获的有机物在发酵过程中均能释放出一定比例的 VFAs,表明此类有机物具有较好的生物可降解性。低分子 VFAs(如乙酸、丙酸)可在厌氧阶段被聚磷菌吸收并合成储能物质(PHB),为好氧吸磷提供能量;同时,它们也可在缺氧区作为反硝化电子供体,促进硝酸盐还原,减少外加碳源消耗^[22]。HQ、SDK、ZY、BLG 进水被捕获的总有机碳中颗粒态有机碳的占比分别为(82.46±2.83)%、(85.50±4.64)%、(79.31±3.71)%、(81.15±6.09)%,其中 HQ、ZY、BLG 进水主要为城市污水,占比与 VFAs 产量顺序一致,说明颗粒态有机物能够被高效水解为可供微生物高效利用的 VFAs。HQ 管网采用分流制,生活污水比例较高,污泥中富含易降解有机质,因此表现出较强的产酸效果;SDK 进水中混有工业废水,但产酸效果仅略低于 HQ,说明工业废水在当前条件下提供了较多易降解的有机物且未产生明显的抑制作用。对产酸效果进行质量衡算,评估产酸对后续脱氮除磷的促进效果。4 座污水厂的平均进水 TCOD 为 148.1 mg/L,通过厌氧产酸可获得 29.24 mg/L 的 VFAs,则计

算得到转化产率约为 0.197 mg/mg,意味着每 100 mg/L 的进水 COD 可以转化为约 19.75 mg/L 的 VFAs,而这些 VFAs 可替代 19.75 mg/L 甲醇、9.85 mg/L 乙酸钠或 18.06 mg/L 葡萄糖。表明捕获污泥中的颗粒态有机物具有较高的产酸潜力,能为后续的脱氮除磷过程提供优质碳源。

2.5 进水中溶解性氮、磷的捕获效果

进水中的颗粒态氮、磷大部分被捕获进入污泥中。为考察溶解性氮、磷的捕获特征,分析其对后续工艺潜在影响,对 PFC 捕获前后水样使用 0.45 μm 滤膜过滤后检测溶解性氮、磷变化。上海市污水处理厂进水中溶解性氮和磷浓度呈现夏季高、冬季低的规律,夏季溶解性氮和磷平均浓度分别为 16.24、3.32 mg/L,冬季溶解性氮和磷平均浓度分别为 1.76、0.53 mg/L。被 PFC 捕获后水样中溶解性氮、磷浓度的变化如图 5 所示,总体捕获效果呈现为溶解性氮捕获率较低而溶解性磷捕获率较高。

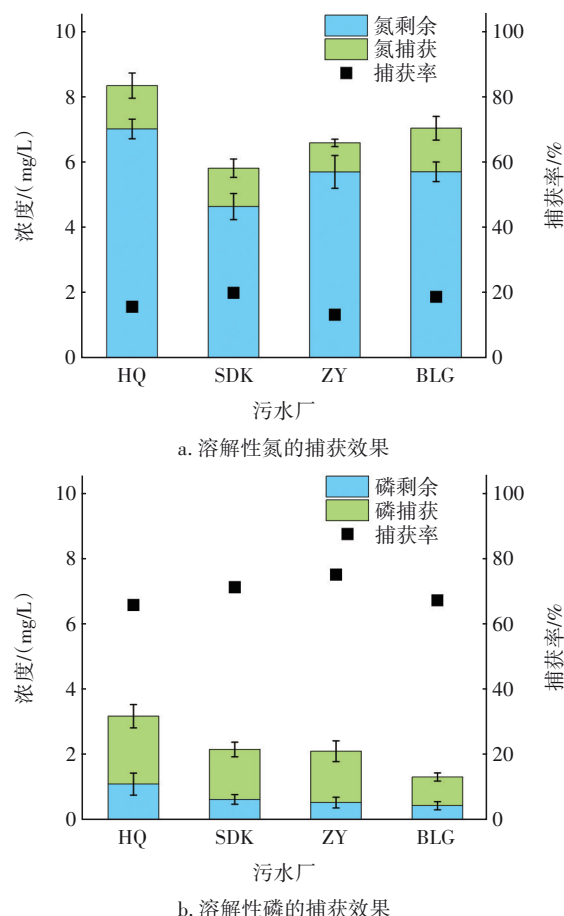


图5 PFC对城市污水中溶解性氮、磷的捕获效果

Fig.5 Capture performance of PFC for TN and TP in municipal wastewater

PFC对溶解性磷的捕获更依赖正磷酸盐的沉淀-吸附固定及卷扫共沉淀,使溶解性磷转化为铁磷沉淀或被固定于絮体中;对溶解性氮的捕获则主要取决于含氮的胶体或大分子是否充足且易于絮凝。PFC对溶解性氮的捕获效果有限,平均捕获率为17.1%,少量氮的去除不会影响A²O系统的正常运行;对溶解性磷的捕获率较高且相对稳定,平均捕获率为69.6%,其中约有(0.67±0.11) mg/L的溶解性磷未被捕获。已有研究表明,PFC对污水中TP的捕获率约为62%^[23],铁基污泥中约33%的磷会随发酵液回流进入主流工艺中^[24],本研究水样平均TP约为3.6 mg/L,依据已有研究会有约0.74 mg/L的磷因发酵产酸被释放,经计算捕获产酸后主流系统仍可获得约1.41 mg/L的磷。因此,使用PFC进行捕获并产酸通常不会带来主流A²O系统氮、磷供给不足的风险。

3 结论

① 上海市污水厂进水中的有机碳主要以颗粒态形式存在,占TCOD的(52.59±6.26)%。PFC对污水中TCOD的平均捕获率为(46.86±2.84)%,其中颗粒态有机物捕获率最高,达到74.90%,但对溶解性及小分子有机物的捕获效果有限。PFC对溶解性磷的捕获效果较高且相对稳定,接近70%;对溶解性氮的捕获效果有限,仅约为17%。

② 溶解性有机物中有60%以上为亲水性有机物,且PFC对亲水性有机物的捕获效果略优于疏水性组分。PFC对生物大分子和低分子质量中性物质有较好的捕获效果,捕获率分别为57.0%和25.9%;PFC对弱憎水性酸性物质和荷电亲水性物质的捕获效果显著,捕获率分别为61.3%和40.7%。PFC对蛋白质类物质和腐殖酸类腐殖质都有较好的捕获效果。

③ PFC混凝捕获的有机物在发酵过程中均能释放出一定比例的挥发性脂肪酸(VFAs),表明此类有机物具有较好的生物可降解性。产酸效果受进水水质影响,采用分流制排水系统且主要为生活污水的HQ污水厂表现出较强的产酸效果,转化产率为0.197 mg/mg,能为后续的脱氮除磷过程提供优质碳源。

参考文献:

[1] HUANG M H, LI Y M, GU G W. Chemical composition

of organic matters in domestic wastewater [J]. Desalination, 2010, 262(1): 36-42.

[2] 王丽花,周振. 国内外城镇污水处理厂排放标准发展现状与修订思考[J]. 中国给水排水, 2024, 40(12): 28-34.

WANG L H, ZHOU Z. Current status and revision thoughts of discharge standards for municipal wastewater treatment plants [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(12): 28-34 (in Chinese).

[3] 刘智晓. 未来污水处理能源自给新途径: 碳源捕获及碳源改向[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 43-52.

LIU Z X. Carbon capture and carbon redirection: new way to optimize the energy self-sufficient of wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 43-52 (in Chinese).

[4] SHEWA W A, DAGNEW M. Revisiting chemically enhanced primary treatment of wastewater: a review [J]. Sustainability, 2020, 12(15): 5928.

[5] DONG T, SHEWA W A, MURRAY K, et al. Optimizing chemically enhanced primary treatment processes for simultaneous carbon redirection and phosphorus removal [J]. Water, 2019, 11(3): 547.

[6] LIN L, LI X Y. Acidogenic fermentation of iron-enhanced primary sedimentation sludge under different pH conditions for production of volatile fatty acids [J]. Chemosphere, 2018, 194: 692-700.

[7] WU D, LI X, LI X. Toward energy neutrality in municipal wastewater treatment: a systematic analysis of energy flow balance for different scenarios [J]. ACS ES&T Water, 2021, 1(4): 796-807.

[8] ANSARI M, FARZADKIA M. Chemically enhanced primary treatment of municipal wastewater: comparative evaluation, optimization, modelling, and energy analysis [J]. Resource Technology Reports, 2022, 18: 101042.

[9] GHERNAOUT D. The hydrophilic/hydrophobic ratio vs. dissolved organics removal by coagulation: a review [J]. Journal of King Saud University-Science, 2014, 26(3): 169-180.

[10] 李冬娜, 马晓军. 污泥厌氧发酵产酸机理及应用研究进展[J]. 生物质化学工程, 2020, 54(2): 51-60.

LI D N, MA X J. Mechanism and research progress of acid synthesis during sludge anaerobic fermentation [J]. Biomass Chemical Engineering, 2020, 54(2): 51-60 (in Chinese).

[11] YUAN Y, HU X, CHEN H, et al. Advances in enhanced volatile fatty acid production from anaerobic

- fermentation of waste activated sludge[J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133741.
- [12] 马小平. 城市污水中有机碳捕获分离及优质碳源定向转化技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2025: 20-26.
- MA X P. Research on Capture and Separation of Organic Carbon and Directed Conversion of High-quality Carbon Sources in Municipal Wastewater[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2025: 20-26(in Chinese).
- [13] 马小平, 李彭, 王拯, 等. 混凝强化一级处理捕获污水有机碳组分的特征分析[J]. 净水技术, 2025, 44(3): 113-122, 178.
- MA X P, LI P, WANG Z, et al. Characteristics analysis of organic carbon components captured by coagulation-enhanced primary treatment of wastewater [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(3): 113-122, 178 (in Chinese).
- [14] MAI A, FUKUSHIMA T, MATSUSHIGE K, et al. Characterization of dissolved organic matter in effluents from wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2002, 36(4): 859-870.
- [15] 王伟, 丁永伟, 尤岚, 等. 分流制排水系统下降雨对污水处理厂运行的影响[J]. 中国给水排水, 2025, 41(1): 9-15.
- WANG W, DING Y W, YOU L, et al. Impact of rainfall on operation of wastewater treatment plants in separate sewer systems[J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(1): 9-15 (in Chinese).
- [16] SUN H, LIN H, SHI J, et al. Insights into the interaction between coagulants and natural organic matter (NOM) in drinking water treatment: a review of floc formation and floc aging [J]. Water, 2025, 17(21): 3124.
- [17] 金冠宇, 李宇昇, 李卫华. 聚合氯化铁强化生物絮凝一级处理工艺[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版), 2020, 37(2): 34-39.
- JIN G Y, LI Y S, LI W H. Primary treatment process of enhanced bioflocculation with polymeric ferric chloride [J]. Journal of Fuyang Normal University (Natural Science Edition), 2020, 37(2): 34-39 (in Chinese).
- [18] ZENG H, LI S, SUN X, et al. Preparation and characterization of polyferric sulfate derived from iron sludge in de-ironing water plants and its utilization in water treatment[J]. Water, 2025, 17(17): 2632.
- [19] ZONG Y, JIN X, LI Y, et al. The coagulation behavior and mechanism of low-coagulability organic matter (LCOM) [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 328: 125055.
- [20] GO R J C, YANG H L, KAN C C, et al. Natural organic matter removal from raw surface water: benchmarking performance of chemical coagulants through excitation-emission fluorescence matrix spectroscopy analysis[J]. Water, 2021, 13(2): 146.
- [21] DAYARATHNE N, ANGOVE M J, ARYAL R, et al. Removal of natural organic matter from source water: review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 40: 101820.
- [22] BEGUM S A, BATISTA J R. Impacts of carbon source addition on denitrification and phosphorus uptake in enhanced biological phosphorus removal systems [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2013, 48(4): 464-473.
- [23] XIE J L, PENG A R, WANG Q, et al. Effects of ferric salt of different forms on phosphorus removal[J]. Global NEST Journal, 2020, 22(4): 619-622.
- [24] YANG H, LIU J, HU P, et al. Carbon source and phosphorus recovery from iron-enhanced primary sludge via anaerobic fermentation and sulfate reduction: performance and future application [J]. Bioresource Technology, 2019, 294: 122174.
-
- 作者简介:**杨军(1972—),男,甘肃兰州人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为固体废弃物资源化处理。
- E-mail:** yangjun@lztu.edu.cn
- 收稿日期:** 2025-11-23
- 修回日期:** 2025-12-18

(编辑:李德强)