



聚丙烯酰胺强化餐厨垃圾水解液固液分离效能及机理分析

韩武杰¹, 郝紫晶¹, 宗雨曦², 吴士民¹, 杨晓胤², 艾靖², 李伟^{1,✉}

1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

摘要 餐厨垃圾水解液具有高 COD、高 C/N 比的特点, 可作为外加碳源应用到污水处理厂生化处理单元。然而, 其富含的大颗粒有机物不易被微生物利用, 可能会导致污水处理厂出水悬浮物和 COD 浓度增高, 阻碍了餐厨垃圾水解液的资源化利用。针对该难题, 采用阴-阳离子型聚丙烯酰胺(PAM)配合使用的方法, 用以强化去除餐厨垃圾水解液中的大颗粒有机物。实验结果表明: 在 pH=5 时, 依次投加 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{gTSS}^{-1}$ 的阴离子型 PAM (APAM) 与 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{gTSS}^{-1}$ 的阳离子型 PAM (CPAM), 餐厨垃圾水解液的归一化毛细吸水时间 (CST_n) 可从 $19.12 \text{ s} \cdot \text{L} \cdot \text{gTSS}^{-1}$ 降至 $0.61 \text{ s} \cdot \text{L} \cdot \text{gTSS}^{-1}$, 实现了较好的固液分离; 在该条件下餐厨垃圾水解液上清液中溶解性 COD (SCOD) 的去除率达 52.81%, 而 BOD_5 基本保持不变, BOD_5/SCOD 由 0.12 升高至 0.26, 大幅提升了可生化性。此外通过对水解液二维红外相关光谱图的分析可知, 处理系统对蛋白质的高效去除是促进水解液固液分离的主要原因。该研究结果对餐厨垃圾水解液的资源化利用有一定的指导作用。

关键词 聚丙烯酰胺; 餐厨垃圾水解液; 固液分离; 响应面曲线; 二维红外相关光谱

餐厨垃圾包括食品加工、饮食服务等活动中产生的餐饮垃圾和厨余垃圾^[1], 具有高含水率和高有机质的特点^[2]。餐厨垃圾易腐烂, 若不采取及时有效的处理措施, 极易造成环境污染问题和公共卫生危害^[3]。自 2010 年开始, 国家发改委、财政部、住建部、生态环境部等国家部委联合发布多个文件, 指导建设餐厨废弃物资源化利用和无害化处理设施; 2021 年, 国家发改委、住建部组织编制的《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》对城镇生活垃圾分类和处理设施建设做出了更加详细的规定。

餐厨垃圾水解液是餐厨垃圾经三相分离器预处理与水解酸化后的产物, 具有高 COD 和高 C/N 比的特点, 是一种适宜、廉价的碳源。餐厨垃圾水解液被广泛应用到厌氧消化工艺中, 为系统内的微生物生命活动提供养料, 提高有机质的转化效率^[4]; 此外, 餐厨垃圾水解液也被用作外加碳源投加至污水处理厂生化单元中, 以提高生物脱氮效果^[5]。然而在实际工程应用中, 直接投加餐厨垃圾水解液可能会出现生物脱氮效果差、出水悬浮物和 COD 浓度升高等问题^[6-7]。究其原因, 一方面大颗粒有机物难以被微生物直接利用, 降低了生化系统中微生物的活性^[8]; 另一方面水解液中的大颗粒有机物可能会改变微生物群落结构, 进而影响生物脱氮效能^[9-10]。因此, 如何有效去除餐厨垃圾水解液中富含的大颗粒有机物, 是提高其资源化利用的关键问题。

聚丙烯酰胺(PAM)是水处理领域常用的絮凝剂, 可高效去除水中颗粒物。本研究比较了不同类别 PAM 独立使用和配合使用处理餐厨垃圾水解液的固液分离效能, 并应用二维红外相关光谱(2D-FTIR-COS)研究不同 pH 下餐厨垃圾水解液傅里叶红外光谱图谱带变化的协变性, 分析了其固液分离效能提高的内在机制。

1 材料与方法

1.1 实验原料

实验所用餐厨垃圾水解液取自浙江省中部某餐厨垃圾处置中心水解酸化罐, 其主要理化指标如下: 含固

收稿日期: 2023-10-13; 录用日期: 2024-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308437); 陕西省自然科学基金基础研究基金资助项目(2021JM-365)

第一作者: 韩武杰(1999—), 男, 硕士研究生, hanwujie1999@163.com ✉通信作者: 李伟(1985—), 男, 博士, 副教授, liwei@xauat.edu.cn

率为 6.23%、VSS/TSS=0.82、pH=3.3±0.1、CST_n=19.12 s·L·gTSS⁻¹、zeta 电位为 -1.57mV；餐厨垃圾水解液上清液的 BOD₅ 含量为 15.60 g·L⁻¹、溶解性 COD (SCOD) 含量为 126.25 g·L⁻¹、蛋白质含量为 2.30 g·L⁻¹、多糖含量为 4.51 g·L⁻¹、挥发性脂肪酸含量为 7.57 g·L⁻¹。

实验所用工业级聚丙烯酰胺 (PAM) 来自安徽巨成精细化工有限公司，主要特性参数如表 1 所示，配制成质量分数为 0.1% 的溶液备用。

1.2 实验方法

取 200 mL 餐厨垃圾水解液置于烧杯中，用质量分数为 25% 的氢氧化钠 (NaOH) 溶液将其 pH 调整至目标值，然后加入适量的 PAM 稀溶液，先以 200 r·min⁻¹ 高速搅拌 3 min；再以 50 r·min⁻¹ 低速搅拌 10 min，使之相互反应完全，静置沉淀 10 min，取 50 mL 餐厨垃圾水解液，高速离心 (6 000 r·min⁻¹，30 min) 后测定其上清液各项指标的变化。

1.3 分析方法

使用污泥毛细吸水时间测定仪 (CST-304B，英国 Triton 公司) 测定餐厨垃圾水解液的毛细吸水时间 (CST)，为消除水解液过滤层厚度不均引起的测定误差，采用水解液固体浓度对 CST 值进行处理得归一化毛细吸水时间 (CST_n)^[11]，见式 (1)。

$$CST_n = \frac{CST}{C} \quad (1)$$

式中：CST_n 是餐厨垃圾水解液的归一化毛细吸水时间，s·L·gTSS⁻¹；CST 是餐厨垃圾水解液的毛细吸水时间，s；C 是餐厨垃圾水解液的固体浓度，gTSS·L⁻¹。

使用傅立叶变换红外光谱仪 (Nicolet iS20，美国 Thermo Fisher 仪器公司) 测定水解液样品的傅里叶变换红外光谱 (FTIR)，并采用结构敏感光谱技术的二维红外相关光谱 (2D-FTIR) 用于分配 FTIR 谱带，并检查其协变性；使用荧光分光光度计 (Hitachi F-4600，日本 Hitachi 公司) 测定餐厨垃圾水解液的荧光激发发射矩阵 (EEM)；使用 Folin-酚试剂法 (Lowry 法) 紫外吸收法测定蛋白质 (PS) 含量^[12]；使用蒽酮-硫酸法测定多糖 (PN) 含量^[12]。

1.4 Box-Behnken 响应面分析

采用 Design-Expert 11 软件展开响应面实验设计。以 -1、0、1 代表自变量水平，以餐厨垃圾水解液 CST_n 值为响应值进行优化处理，并进行方差分析。

2 结果与讨论

2.1 不同絮凝剂对餐厨垃圾水解液固液分离效能的影响

1) 单独使用 CPAM、APAM 对餐厨垃圾水解液固液分离的效能。归一化毛细吸水时间 (CST_n) 可以反映餐厨垃圾水解液中自由水的过滤性能，CST_n 值越大表明水解液的固液分离效能越差。在不同 CPAM、APAM 投加量条件下，餐厨垃圾水解液固液分离特征随水解液 pH 的变化如图 1 所示。单独使用 CPAM 处理餐厨垃圾水解液时，随着絮凝剂投加量的增加，水解液体系的 CST_n 值呈现先降后升的趋势；而当固定 CPAM 投加量时，水解液体系的 CST_n 值随着 pH 的升高也呈现出先降后升的趋势 (见图 1(a))；在 pH=5、单独投加 4.0 mg·gTSS⁻¹CPAM 时，水解液体系的 CST_n 值出现最低值，为 8.30 s·L·gTSS⁻¹。而对阴离子型 PAM 而言，水解液体系的 CST_n 值随着 APAM 投加量的增加而不断升高；同时发现，反应体系的 CST_n 值随着水解液 pH 的升高而不断增加 (见图 1(b))，固液分离效能不断下降；在 pH=3.3、单独投加 4.8 mg·gTSS⁻¹APAM 时水解液体系的 CST_n 值出现最低值，为 10.11 s·L·gTSS⁻¹。以上差异可能是由于 APAM 分子量大于 CPAM，投加 APAM 的水解液体系粘度上升更加显著所致^[13]。鉴于单独使用 CPAM、APAM 仅可将餐厨垃圾水解液的 CST_n 值由 19.12 s·L·gTSS⁻¹ 降低至 8.30 s·L·gTSS⁻¹ 和 10.11 s·L·gTSS⁻¹，无法大幅改善其固液分离效能，故考虑应用 APAM-CPAM 配合的方式处理餐厨垃圾水解液，优化其固液分离特征。

表 1 聚丙烯酰胺的特性参数

Table 1 Characteristic parameters of polyacrylamide

项目	阳离子型聚丙烯酰胺	阴离子型聚丙烯酰胺
药剂名称	CPAM	APAM
分子量/万	≥800	1 800~2 100
离子度/水解度/%	55.00~60.00	30.00~35.00
固含量/%	≥88.50%	≥88.50%

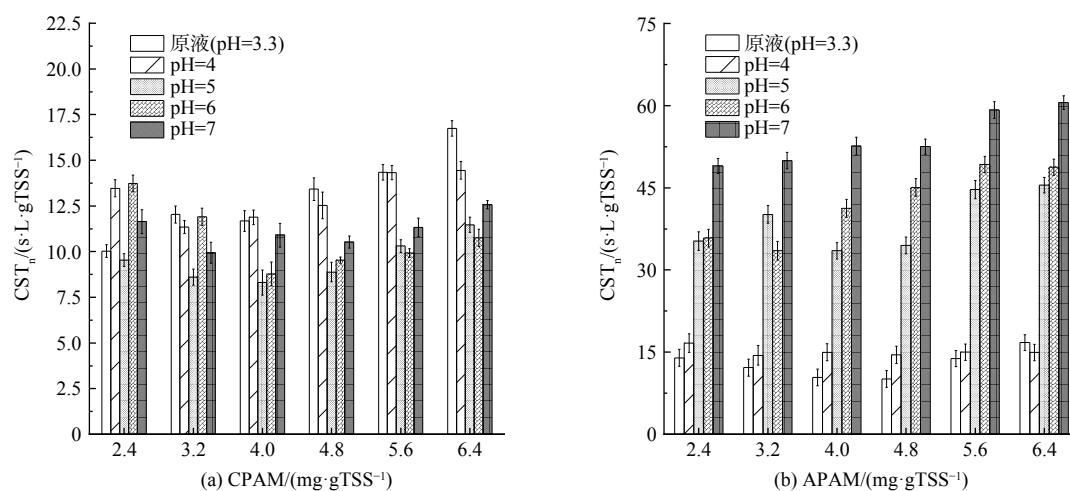


图 1 不同 pH 条件下, CPAM、APAM 投加量对餐厨垃圾水解液固液分离效能的影响

Fig. 1 Effect of CPAM and APAM dosages on solid-liquid separation efficacy of kitchen waste hydrolysate under different pHs

2) 阴-阳离子型聚丙烯酰胺配合使用对餐厨垃圾水解液固液分离的影响。以上分析可知, PAM 种类、投加量及溶液 pH 均可影响餐厨垃圾水解液的固液分离效能。为探究各个因素对餐厨垃圾水解液固液分离效能的影响程度, 采用 Box-Behnken 方法进行实验设计, 以餐厨垃圾水解液 CST_n 作为响应值, APAM 投加量 (A)、CPAM 投加量 (B) 和 pH (C) 作为优化值, 建立数学回归模型。实验因素及对应水平见表 2。

根据表 3 中实验结果, 利用 Design-Expert 13 分析软件对 Box-Behnken 实验结果进行二次回归分析, 获得回归方程 (式 (2))。

$$Y = 0.7264 + 0.4027A + 0.2782B - 0.0656C + 0.0666AB + 0.1550AC - 0.4113BC + 1.23A^2 + 1.13B^2 + 1.33C^2 \quad (2)$$

对实验结果进行了显著性检验及方差分析。上述回归方程模型的相关系数和调整相关系数分别为 $R^2=0.9815$ 和 $R^2_{Adj}=0.9578$, 表明该模型与样本的相关性较高, 回归方程的拟合程度较好, 其最终的分析结果是稳定可信的。此外, 由表 4 的 F 值可以得出, 在回归方程的一次项中, 各因素对餐厨垃圾水解液 CST_n 值的影响从大到小的顺序为: A>B>C, 即 APAM 投加量>CPAM 投加量>pH。

为了考虑各因素及其交互作用对餐厨垃圾水解液 CST_n 值的影响, 采用 Design-Expert 11 软件辅助分析, 建立 APAM 投加量 (A)、CPAM 投加量 (B) 和 pH (C) 的两两交互效应响应面图 (见图 2)。从响应面图中可以发现图 2(c) 较陡峭, 说

表 2 实验因素及水平

Table 2 Experimental ranges and levels of the independent variables

因素	编码	水平		
		-1	0	1
APAM投加量/(mg·gTSS ⁻¹)	A	2.4	4.0	5.6
CPAM投加量/(mg·gTSS ⁻¹)	B	2.4	4.0	5.6
pH	C	3	5	7

表 3 Box-Behnken 实验设计及响应值

Table 3 Experimental design and response of Box-Behnken design

序列	A	B	C	CST _n /(s·L·gTSS ⁻¹)
1	0	1	-1	3.85
2	0	0	0	0.87
3	1	-1	0	2.88
4	1	1	0	3.65
5	-1	-1	0	2.64
6	0	0	0	0.72
7	0	-1	1	3.33
8	1	0	-1	3.85
9	0	1	1	2.98
10	1	0	1	3.95
11	-1	0	1	2.40
12	0	0	0	0.79
13	-1	1	0	3.15
14	0	-1	-1	2.56
15	-1	0	-1	2.92
16	0	0	0	0.65
17	0	0	0	0.60

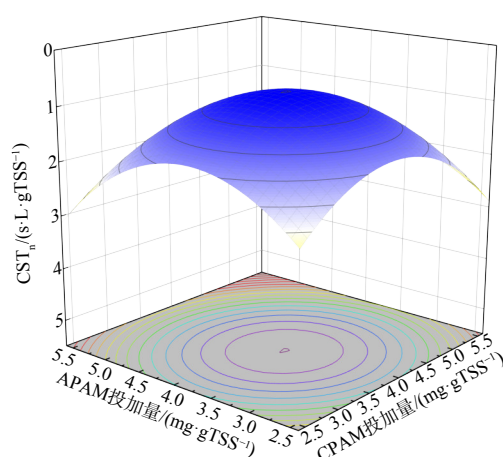
明 CPAM 投加量与 pH 两个因素的交互响应对餐厨垃圾水解液 CST_n 值的影响程度很大。与此同时,观察底部的等高线可以发现,若保持 pH 不变,可以明显观察到在 CPAM 投加量一侧的等高线要更为密集,因此其对餐厨垃圾水解液 CST_n 值的影响要大于 pH,其他交互因素的分析同理。通过对于三个交互因素的响应面分析可以发现,交互因素对餐厨垃圾水解液 CST_n 值的影响程度如下: $BC > AC > AB$,与表 4 中对回归方程的分析一致。

对回归拟合方程进行求解,分析得出 CST_n 值最低时的最佳条件: $A=3.2 \text{ mg} \cdot \text{gTSS}^{-1}$, $B=4.0 \text{ mg} \cdot \text{gTSS}^{-1}$, $C=4.85$;在此条件下,最佳预测 CST_n 值为 $0.58 \text{ s} \cdot \text{L} \cdot \text{gTSS}^{-1}$ 。根据实际操作的可行性,本研究选定的最优实验条件为: $\text{pH}=5$ 、依次投加 $3.2 \text{ mg} \cdot \text{gTSS}^{-1}$ 的 APAM 与 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{gTSS}^{-1}$ CPAM。在该条件下,水解液的 CST_n 值为 $(0.61 \pm 0.05) \text{ s} \cdot \text{L} \cdot \text{gTSS}^{-1}$,与模型预测值 $(0.58 \text{ s} \cdot \text{L} \cdot \text{gTSS}^{-1})$ 相当。研究表明, PAM 对体系内的胶体颗粒具有

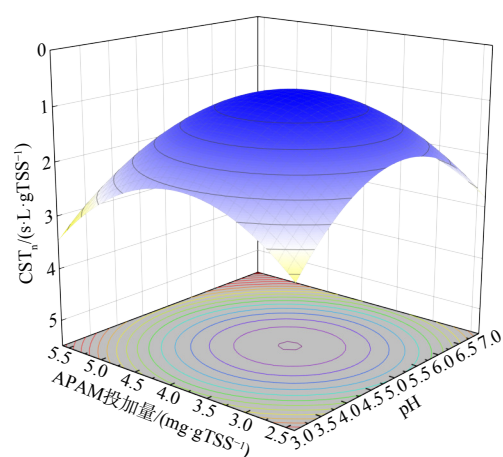
表 4 Box-Behnken 响应面实验结果方差分析

Table 4 Variance analysis of Box-Behnken response surface experiment results

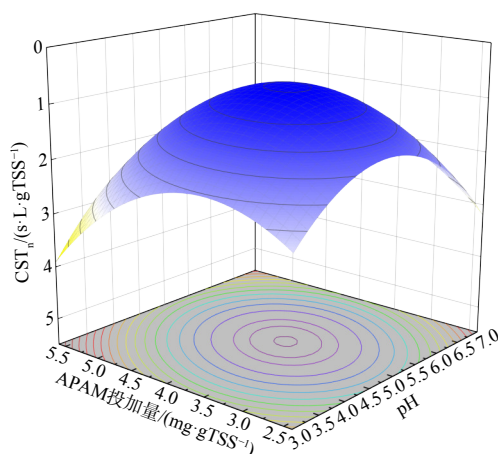
方差来源	自由度	平方和	均方	F值	P值
模拟	9	24.06	2.67	41.34	<0.000 1
A	1	1.30	1.30	20.07	0.002 9
B	1	0.619 3	0.619 3	9.58	0.017 5
C	1	0.034 5	0.034 5	0.532 8	0.489 1
AB	1	0.017 7	0.017 7	0.274 2	0.616 7
AC	1	0.096 1	0.096 1	1.49	0.262 3
BC	1	0.676 5	0.676 5	10.46	0.014 4
A^2	1	6.34	6.34	98.04	<0.000 1
B^2	1	5.34	5.34	82.53	<0.000 1
C^2	1	7.41	7.41	114.57	<0.000 1
残差	7	0.452 7	0.064 7		
失拟	3	0.405 9	0.135 3	11.56	0.069 3
纯误差	4	0.046 8	0.011 7		
总离差	16	24.51			



(a) APAM投加量与CPAM投加量交互响应



(b) APAM投加量与pH的交互响应



(c) CPAM投加量与pH的交互响应

图 2 APAM 投加量、CPAM 投加量和 pH 对 CST_n 值交互效应的响应面图

Fig. 2 Response surface graph of the interaction effects of APAM dosage, CPAM dosage, and pH on CST_n values

很强的电中和作用和吸附架桥作用^[14-15]。在 pH=5 的条件下餐厨垃圾水解液中的大颗粒有机物首先与 APAM 产生大量粒径较小的初级絮凝体，大分子长链 APAM 承担吸附架桥作用；接着初级配合物在 CPAM 电荷中和与粒子间桥接的双重作用下进一步聚合成成为较大粒径的絮凝体^[16]，最终完成餐厨垃圾水解液固液分离。

3) 阴-阳离子型聚丙烯酰胺配合使用后餐厨垃圾水解液的可生化性特征。如图 3(a) 所示，在最优条件下，餐厨垃圾水解液上清液蛋白质含量由 $2.30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $1.62 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，而多糖含量则由 $4.51 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至 $7.51 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这表明在利用 APAM-CPAM 配合处理餐厨垃圾水解液时，去除了其含有的蛋白质类物质，而保留了多糖类物质。进一步对餐厨垃圾水解液的荧光激发发射矩阵进行分析发现，经 PAM 处理后水解液中的芳香类蛋白质物质 I (Ex/Em=200~250 nm/260~320 nm)、芳香类蛋白质物质 II (Ex/Em=200~250 nm/320~380 nm) 含量大幅下降 (见图 3(c)(d))，也表明蛋白质的去除是餐厨垃圾水解液固液分离效能改善的主要原因。艾靖等^[17]在利用 $\text{Fe}^{2+}/\text{SO}_3^{2-}$ 氧化与 PAM 协同强化剩余污泥脱水性能时也发现：去除样品中的蛋白质，可大幅提高剩余污泥的脱水性能。图 3(b) 则表明，在 APAM-CPAM 配合使用后，餐厨垃圾水解液上清液中的 SCOD 去除率达到 52.81%，而 BOD_5 含量基本保持不变，餐厨垃圾水解液的 BOD_5/SCOD 值从 0.12 上升

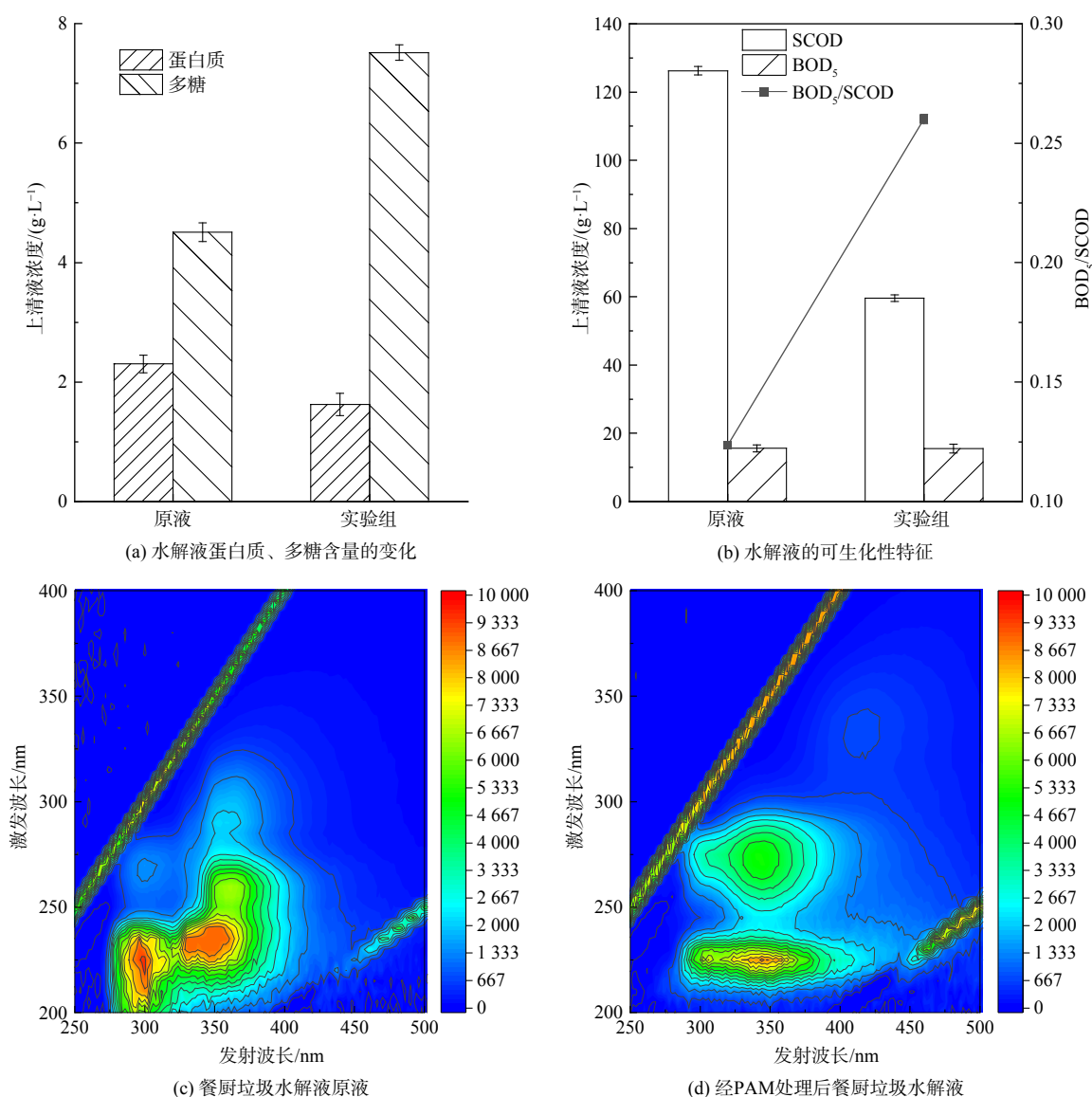


图 3 阴-阳离子型聚丙烯酰胺，餐厨垃圾水解液的可生化性特征

Fig. 3 Anionic-cationic polyacrylamide, biochemical characterization of kitchen waste hydrolysate

至 0.26。这表明餐厨垃圾水解液在固液分离过程中除不溶性大分子颗粒物外, 部分溶解性有机物也通过 PAM 的絮凝行为沉降到固相絮体当中, 导致餐厨垃圾水解液中 SCOD 降低, 大幅提高其可生化性。上述研究表明, APAM-CPAM 配合使用不仅能够强化餐厨垃圾水解液的固液分离, 还能够保证分离后上清液具有更好的可生化性。

2.2 餐厨垃圾水解液固液分离效能的影响机制

上述研究表明, pH 变化对餐厨垃圾水解液固液分离效能具有显著影响(见图 1、图 2(b)(c))。为研究不同 pH 下餐厨垃圾水解液的反应位点, 本文测定其傅里叶变换红外光谱图。如图 4(a) 所示, 在波长 $3\,440\text{ cm}^{-1}$ 处, 光谱图出现游离仲酰胺基的伸缩振动, 峰强先减弱后增强; 波长 $1\,400\text{ cm}^{-1}$ 与 $1\,600\text{ cm}^{-1}$ 处双峰为氨基酸的羧酸盐根则增强; 在波长 $1\,120\text{ cm}^{-1}$ 处, 出现开链酸酐, 为 C-O-C 伸缩振动吸收峰。FTIR 光谱图结果初步表明, 相对于多糖而言, 蛋白质与 pH 变化具有更强的相关性。为了更深入地了解随着 pH 变化餐厨垃圾水解液中临界基团转变特征, 应用二维相关计算来分配 FTIR 光谱图的谱带, 并研究其协变性, 如图 4(b) 所示。从水解液 pH 变化的 FTIR 光谱图中获得的同步图谱分别在 $1\,380\text{ cm}^{-1}$ (氨基酸的 COO^- 基团)、 $1\,640\text{ cm}^{-1}$ (蛋白质的 COO^- 基团)、 $1\,030\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,190\text{ cm}^{-1}$ (多糖的 C-O-C 和 C-OH) 处显示出 4 个主要的自峰^[18-19]。其中, $1\,030\text{ cm}^{-1}$ 处的峰颜色比其他峰深, 表明在 pH 变化过程中, $1\,030\text{ cm}^{-1}$ (氨基酸的 COO^-) 的谱带强度变化最大。此外, $1\,640/1\,380$ 、 $1\,640/1\,190$ 、 $1\,640/1\,030$ 、 $1\,380/1\,190$ 、 $1\,380/1\,030$ 和 $1\,190/1\,030\text{ cm}^{-1}$ 的 λ_x/λ_y 处的 6 个交叉峰呈正相关, $1\,380/1\,640$ 、 $1\,190/1\,640$ 、 $1\,030/1\,640$ 、 $1\,030/1\,380$ 和 $1\,030/1\,190\text{ cm}^{-1}$ 的五个交叉峰呈负相关。在异步映射中, $1\,640/1\,380$ 、 $1\,640/1\,190$ 、 $1\,640/1\,030$ 和 $1\,190/1\,030\text{ cm}^{-1}$ 的 λ_x/λ_y 处的交叉峰呈正相关, 而 $1\,380/1\,640$ 、 $1\,190/1\,640$ 、 $1\,030/1\,640$ 、 $1\,030/1\,380$ 和 $1\,030/1\,190\text{ cm}^{-1}$ 的交叉峰则呈负相关。根据 Noda 规则^[20], 在 pH 变化过程中, 餐厨垃圾水解液有机质谱带

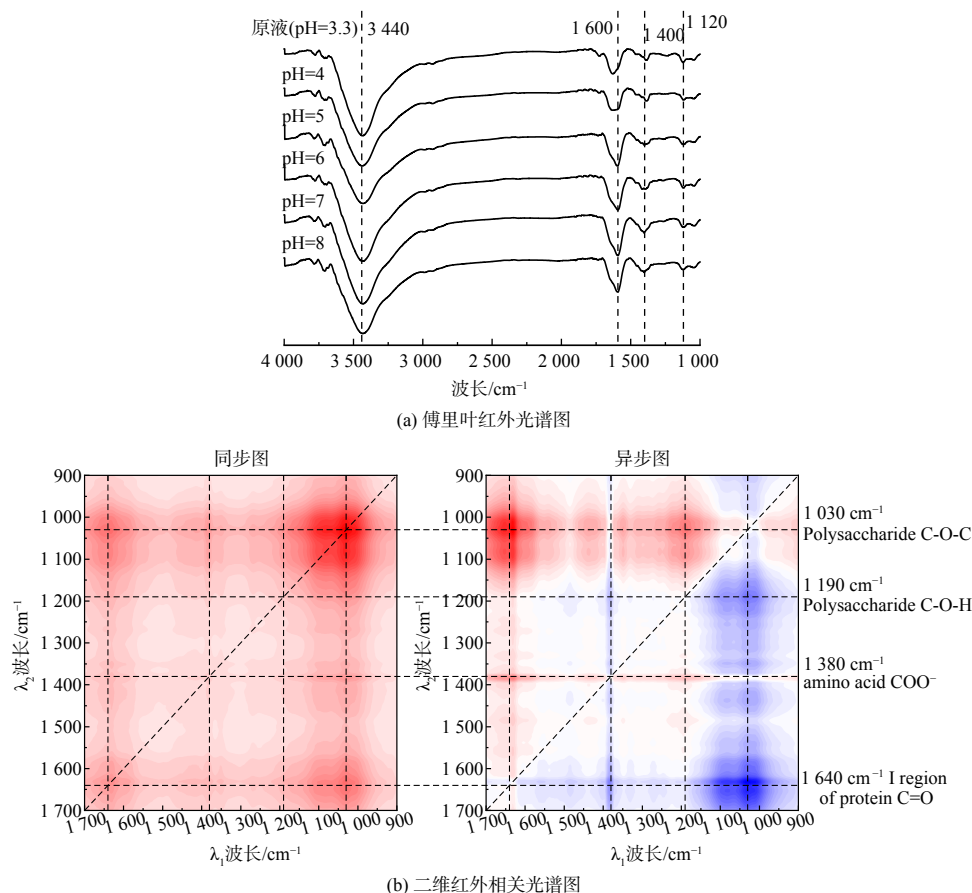


图 4 不同 pH 下, 餐厨垃圾水解液的傅里叶变换红外光谱图与二维红外相关光谱图

Fig. 4 Fourier infrared spectrograms and 2D correlation spectrograms of kitchen waste hydrolysate at different pHs

与氢氧根离子(OH^-)^[21]的亲合力顺序为: $1\ 640 > 1\ 190 > 1\ 380 > 1\ 030\ \text{cm}^{-1}$, 因此餐厨垃圾水解液关键成分的变化顺序为: 蛋白质的酰胺 I 区 $\text{C}=\text{O}$ > 多糖的 $\text{C}-\text{OH}$ > 羧基 $\text{C}-\text{O}$, 氨基酸的 COO^- > 多糖的 $\text{C}-\text{O}-\text{O}$ 。结合 APAM-CPAM 配合使用处理餐厨垃圾水解液固液分离过程中上清液蛋白质与多糖含量的变化, 不难发现氨基酸上的氨基与羧基较多糖上的多羟基醛或多羟基酮而言更易与 PAM 上的基团结合, 发生絮凝行为; 同时 PAM 也会进一步降低餐厨垃圾水解液的固液界面亲和力^[22], 促进餐厨垃圾水解液体系实现高效固液分离。

3 结论

1) 在 $\text{pH}=5$ 条件下, 依次投加 $3.2\ \text{mg}\cdot\text{gTSS}^{-1}$ 的 APAM 和 $4.0\ \text{mg}\cdot\text{gTSS}^{-1}$ 的 CPAM, 餐厨垃圾水解液的 CST_n 值可以从 $19.12\ \text{s}\cdot\text{L}\cdot\text{gTSS}^{-1}$ 下降到 $0.61\ \text{s}\cdot\text{L}\cdot\text{gTSS}^{-1}$, 获得了较好的固液分离效能; 同时上清液的 BOD_5/SCOD 值由 0.12 上升至 0.26, 其可生化性也大幅提高。

2) 通过进行餐厨垃圾水解液的反应位点及光谱图谱带的协变性分析, 发现随着 pH 的变化, 餐厨垃圾水解液组分的变化依次为: 蛋白质的酰胺 I 区 $\text{C}=\text{O}$ > 多糖的 $\text{C}-\text{OH}$ > 羧基 $\text{C}-\text{O}$, 氨基酸的 COO^- > 多糖的 $\text{C}-\text{O}-\text{O}$, 这表明絮凝剂对蛋白质的高效去除是实现餐厨垃圾水解液高效固液分离的关键。

参考文献

- [1] KUNWAR P, KUSHWAHA S K, MONIKA Y, et al. Food waste to energy: an overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient recycling[J]. *BioMed Research International*, 2017, 2017: 1-19.
- [2] MENG Q C, LIU H B, ZHANG H D, et al. Anaerobic digestion and recycling of kitchen waste: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2022: 1-18.
- [3] AJAY C M, MOHAN S, DINESHA P. Decentralized energy from portable biogas digesters using domestic kitchen waste: a review[J]. *Waste Management*, 2021, 125: 10-26.
- [4] LUSK P. Methane recovery from animal manures the current opportunities casebook[R]. United States, 1998.
- [5] ADAV S S, LEE D J, LAI J Y. Enhanced biological denitrification of high concentration of nitrite with supplementary carbon source[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85(3): 773-778.
- [6] 熊建军. 餐厨垃圾厌氧发酵制备污水处理外加碳源及其反硝化性能评价[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2021.
- [7] 唐嘉陵. 餐厨垃圾发酵碳源制备及其生物脱氮利用性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- [8] ZHANG Y M, WANG L M, HAN W, et al. Nitrate removal, spatiotemporal communities of denitrifiers and the importance of their genetic potential for denitrification in novel denitrifying bioreactors[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 241: 552-562.
- [9] QI S S, YUAN S J, WANG W, et al. Effect of solid-liquid separation on food waste fermentation products as external carbon source for denitrification[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 284(9): 124687.
- [10] WANG H F, HU H, WANG H J, et al. Combined use of inorganic coagulants and cationic polyacrylamide for enhancing dewaterability of sewage sludge[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 387-395.
- [11] 张伟军. 基于污泥高压脱水的化学预调理反应机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学生态环境研究中心, 2015.
- [12] ZHANG W J, TANG M Y, YWANG P, et al. Micro-interfacial mechanisms on sludge dewaterability enhancement using cerium chloride for preparation of carbon-based functional material[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 386: 121930.
- [13] 方道斌, 郭睿威, 哈润华, 等. 丙烯酰胺聚合物[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 23-30.
- [14] ZHAI L F, SUN M, SONG W, et al. An integrated approach to optimize the conditioning chemicals for enhanced sludge conditioning in a pilot-scale sludge dewatering process[J]. *Bioresour Technol*, 2012, 121: 161-168.
- [15] BORÁŇ J, HOUDKOVÁ L, ELSÄßER T. Processing of sewage sludge: Dependence of sludge dewatering efficiency on amount of flocculant[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(5): 278-282.
- [16] HOGG R. The role of polymer adsorption kinetics in flocculation[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1999, 146(1): 253-263.
- [17] AI J, WANG Z Y, DIONYSIOU D D, et al. Understanding synergistic mechanisms of ferrous iron activated sulfite oxidation and organic polymer flocculation for enhancing wastewater sludge dewaterability[J]. *Water Research*, 2021, 189: 116652.
- [18] WANG B B, LIU X T, CHEN J M, et al. Composition and functional group characterization of extracellular polymeric substances (EPS) in activated sludge: the impacts of polymerization degree of proteinaceous substrates[J]. *Water Research*, 2018, 129: 133-142.
- [19] XIE Q T, LIU N, LIN D H, et al. The complexation with proteins in extracellular polymeric substances alleviates the toxicity of Cd (II) to *Chlorella vulgaris*[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114102.
- [20] NODA I, OZAKI Y. Two-dimensional correlation spectroscopy: applications in vibrational and optical spectroscopy. London: John Wiley and Sons Inc, 2004.
- [21] 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 等. 基于光谱特征的 pH 对溶解态有机质与铜相互作用的影响研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(5): 1628-1635.
- [22] LIANG J I, TAN Z X, ZHANG L, et al. Chalcopyrite-activated sodium percarbonate oxidation for sludge dewaterability enhancement: Synergetic roles of $\cdot\text{OH}$ and $1\ \text{O}_2$ [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142863.

(责任编辑: 金曙光)

Enhanced solid-Liquid separation of kitchen waste hydrolysate using polyacrylamide: efficiency and mechanism

HAN Wujie¹, HAO Zijong¹, ZONG Yuxi², WU Shimin¹, YANG Xiaoyin², AI Jing², LI Wei^{1,*}

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. College of Environment, China University of Geoscience(Wuhan), Wuhan 430074, China

*Corresponding author, E-mail: liweixauat@xauat.edu.cn

Abstract Kitchen waste hydrolysate (KWH), characterized by high COD and high C/N ratio, can be utilized as an additional carbon source in the biological treatment unit of wastewater treatment plants. Nevertheless, the organic matter present in KWH with larger particles may not be readily metabolized by microbes, leading to elevated concentrations of suspended solids and COD in the effluent. This limitation hinders its widespread application. To address this issue, this study proposed the sequential use of anionic-cationic polyacrylamide (PAM) to enhance the removal of large-particle organic matter from KWH. Experimental results indicated that, at pH=5, sequential addition of $3.2 \text{ mg} \cdot \text{gTSS}^{-1}$ anionic PAM (APAM) and $4.0 \text{ mg} \cdot \text{gTSS}^{-1}$ cationic PAM (CPAM) reduced the normalized capillary suction time (CST_n) of the hydrolysate from $19.12 \text{ s} \cdot \text{L} \cdot \text{gTSS}^{-1}$ to $0.61 \text{ s} \cdot \text{L} \cdot \text{gTSS}^{-1}$, achieving effective solid-liquid separation. Under this condition, the removal efficiency of the soluble COD (SCOD) in supernatant of KWH reached 52.81%, while the concentration of BOD_5 remained unchanged. As a result, the ratio of BOD_5/SCOD increased from 0.12 to 0.26, significantly improving the biodegradability of KWH. In addition, the efficient removal of proteins in KWH was the main reason for promoting solid-liquid separation of the hydrolysate, as indicated by the analysis of two-dimensional infrared correlation spectra. The results of this study may contribute to promoting the resource utilization of KWH.

Keywords polyacrylamide; kitchen waste hydrolysate; solid-liquid separation; response surface curve; 2D-FTIR-COS