



外源性物质对消化沼液中 DOM 光谱特征的影响

余羿琮, 周翠红, 冯书耕[✉], 张明玉, 王梦涵

北京石油化工学院机械工程学院环境工程系, 北京 102617

摘 要 餐厨垃圾厌氧消化产酸是其资源化、能源化利用的重要途径, 但消化过程中产生的沼液成为限制技术发展的关键因素, 沼液处理成为亟需解决的问题, 需要明确其组分才能更好实现沼液产品的增值化。通过添加外源性物质与自身源物质对比, 采用三维荧光光谱结合区域积分和平行因子技术, 探究餐厨垃圾消化沼液中溶解性有机物 (DOM) 的荧光组分和荧光强度差异与餐厨垃圾厌氧消化产酸性能。研究表明, 加入外源性物质的餐厨垃圾厌氧消化能够缩短乙酸产出时间, 总氮含量与区域积分法分析出的芳香类蛋白质 I 有显著正相关关系, 区域积分分析与平行因子分析能够揭示沼液中溶解性有机物的类别并显示各组分的变化, 加入外源性物质能够促进餐厨垃圾厌氧消化 DOM 的产生。本研究结果可为沼液产品增值化的应用提供理论参考。

关键词 厌氧消化; 餐厨垃圾; 溶解性有机物; 区域积分法; 平行因子法

随着我国经济的快速发展和生活水平的不断提高, 餐厨垃圾的产量逐年增加。据统计, 全球每年产生约 1.3×10^8 t 餐厨垃圾, 而在中国餐厨垃圾的产量已占城市生活垃圾总量的 50% 以上, 资源回收潜力巨大^[1]。另一方面, 剩余污泥产量逐年增加和处理效率低下也是亟需解决的问题^[2]。厌氧消化是餐厨垃圾和剩余污泥的主要处理方式, 同时厌氧工艺会产生大量高浓度有机废水-沼液^[3]。消化沼液占厌氧消化产物总量的 80%~90%, 其具有产量大、营养物质丰富等优点, 有极高的经济和环境价值^[4]。沼液中含有大量溶解性有机物 (dissolved organic matter, DOM), 包括不同种类的有机化合物, 如碳水化合物、蛋白质和有机酸等^[5]。处理不当会通过地表径流排放或地下水渗透污染水体, 进而威胁环境和生态系统^[6]。DOM 的组成和结构特征对于研究厌氧消化过程中许多成分的转化和归宿有重要作用。

DOM 是指存在于各类水体中可以通过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜的有机质混合物^[7], 常用的表征技术有紫外可见吸收光谱法^[8]、三维荧光光谱法^[9]、核磁共振法^[10]和傅里叶变换离子回旋共振质谱^[11]等, 其中三维荧光光谱法具有灵敏度高、无需化学试剂、对样品无破坏等特点^[12-13], 广泛应用于河流、湖泊、地下水等水体的检测及水质评价等方面研究^[14-16]。三维荧光技术已经成功地应用于环境水体中 DOM 的识别和解析, 但是很少用于沼液检测。三维荧光光谱结合数据分析方法如荧光区域积分法 (fluorescence regional integration, FRI)、平行因子分析法 (parallel factor analysis, PARAFAC) 能够实现 DOM 有机组分的分离和定量。FRI 方法可用于对三维荧光光谱重叠对象光谱识别和相对定量表征^[17-18]。PARAFAC 方法可以实现三维荧光光谱重叠荧光峰的解析, 准确识别出荧光峰的个数、位置及最大荧光强度^[19]。结合区域积分法与平行因子法, 将一定程度上揭示沼液中 DOM 的类别并显示其变化趋势。

本研究针对沼液处理采用三维荧光光谱技术为表征手段, 对加入不同来源物质的餐厨垃圾厌氧消化过程中消化沼液内的 DOM 进行检测和分析, 结合 FRI 法和 PARAFAC 法, 提取有效的荧光光谱特征, 考察沼液中 DOM 的含量变化并进行综合评估, 将为该领域的研究人员深入了解餐厨垃圾厌氧消化过程中 DOM 的全过程变化提供有用的参考。

收稿日期: 2024-01-04 录用日期: 2024-02-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51104022); 大学生研究训练计划资助项目 (2022J00186)

第一作者: 余羿琮 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为有机废物资源化利用, 2017310604@bipt.edu.cn ✉通信作者: 冯书耕 (1983—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为有机废物资源化利用, fengshugeng@bipt.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验材料与装置

实验装置主要由消化容器、温控装置、采样装置及集气装置组成如图 1 所示。其中选用 500 mL 广口瓶作为消化容器，恒温水浴锅（SYG-A2-4，天津市泰斯特仪器有限公司）作为温控装置、500 mL 气体采样袋作为集气装置、10 mL 注射器作为采样装置。研究采集的外源性物质（剩余污泥）来自于北京某污水处理厂 MBR 池出口，自身源物质（餐厨垃圾）来自本学校学生食堂泔水桶。样品均经前处理后通过 2 mm 滤网去除大颗粒杂质，其中污泥样品经过沉淀浓缩处理，餐厨样品去除大骨头后等杂物后破碎处理。各取部分样品在压力蒸汽灭菌器（YXQ-LS，上海博讯医疗生物仪器股份有限公司）中热水解 30 min（表压 0.11 MPa，121 ℃）。消化底物为 200 mL 餐厨垃圾，以 1：1 的体积比加入水解后的外源性物质构成厌氧消化 Ki 组，以相同比例加入水解后的自身源物质构成厌氧消化 K 组。样品放入消化容器中进行厌氧消化实验，消化容器置于恒温水浴锅进行厌氧消化，实验设置 2 组平行样，每组测样两次，温度控制为 (35±1) ℃。厌氧消化共计 33 d，每隔 3 d 用排水法测量集气袋的总气量（Gas），用注射器吸取沼液并分装置于-20 ℃ 冰箱保存。

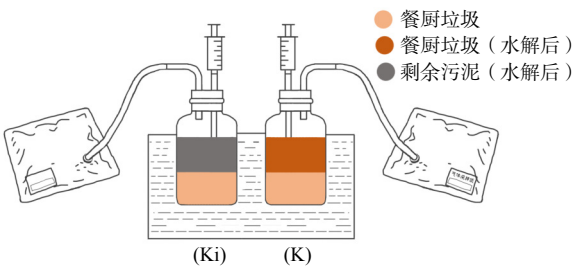


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

1.2 样品测试方法

本实验所测理化指标以 1:50 的比例稀释后测定。乙酸（C₂H₄O₂）测定采用国家标准《环境空气 降水中有有机酸（乙酸、甲酸和草酸）的测定 离子色谱法》（HJ 1004—2018）。COD 测定采用国家标准《水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法》（HJ 828—2017）。pH 值测定采用国家标准《水质 pH 值的测定 玻璃电极法》（GB 6920—1986）。总氮（TN）测定采用国家标准《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》（HJ 636—2012）。

1.3 荧光数据分析方法

采用荧光光谱仪（Cary Eclipse，美国安捷伦科技有限公司）测试沼液的三维荧光特征光谱。将沼液以 1:200 的比例稀释经 0.45 μm 滤膜过滤后置于石英比色皿中测试。测试其三维荧光光谱，波长范围选择激发波长（Ex）为 200~450 nm，步长为 5 nm；发射波长（Em）为 250~550 nm，步长为 5 nm，狭缝宽度为 5 nm，扫描速度 2 400 nm·min⁻¹。

1) FRI 法。FRI 法由 CHEN 等^[20] 提出，将激发、发射波长所形成的二维荧光区域分成了 5 个部分，代表 5 种不同类型的有机物，如表 1 所示。用 Origin 2023 软件计算出特定荧光区域的积分体积，即具有相似性质有机物的累积荧光强度，然后对体积积分进行标准化得到特定荧光区域积分标准体积。

表 1 5 个荧光积分区域

Table 1 Five fluorescence integrated regions

区域	所代表有机物类型	Ex/nm	Em/nm
I	芳香蛋白类物质 I	220~250	280~330
II	芳香蛋白类物质 II	220~250	330~380
III	富里酸类物质	220~250	380~540
IV	溶解性微生物代谢产物	250~280	280~380
V	腐殖酸类物质	250~440	380~540

2) PARAFAC 法。PARAFAC 法是由 STEDMON 等^[21] 在主成分分析的基础上对三维荧光光谱峰分离提出平行因子法，由 MURPHY 等^[22] 对平行因子算法进行优化改进，并建立在线组分共享对比和基于 Matlab 软件平台下 drEEM 三维荧光平行因子工具箱。在 MATLAB R2019a 软件中使用 drEEM-0.6.5 工具箱^[23] 对激发发射矩阵数据进行建模，去除瑞利散射和拉曼散射的干扰后，将模型限制为非负值，使用残差分析和拆半分析对组分数量进行检验，最终确定合适的组分数量^[24]。

2 结果与讨论

2.1 理化指标分析

厌氧消化过程中所测得的理化指标变化如图 2 所示。Gas 最大产量 K 组在第 3 d 达到最大气量 92 mL, Ki 组在第 15 d 达到最大气量 103.5 mL。C₂H₄O₂ 含量随着厌氧消化进程呈现先升高后逐渐降低趋势, 其中 K 组最大含量 71.69 g·L⁻¹ 出现在第 18 d, Ki 组最大含量 50.08 g·L⁻¹ 出现在第 9 d。K 组和 Ki 组厌氧环境均呈现酸性, K 组的酸性更强。K 组的 COD 含量显著高于 Ki 组, K 组平均为 75.18 g·L⁻¹, Ki 组平均为 43.86 g·L⁻¹。TN 含量 K 组最大为 0.70 g·L⁻¹, Ki 组最大为 0.88 g·L⁻¹, TN 量和 Gas 量呈负相关。

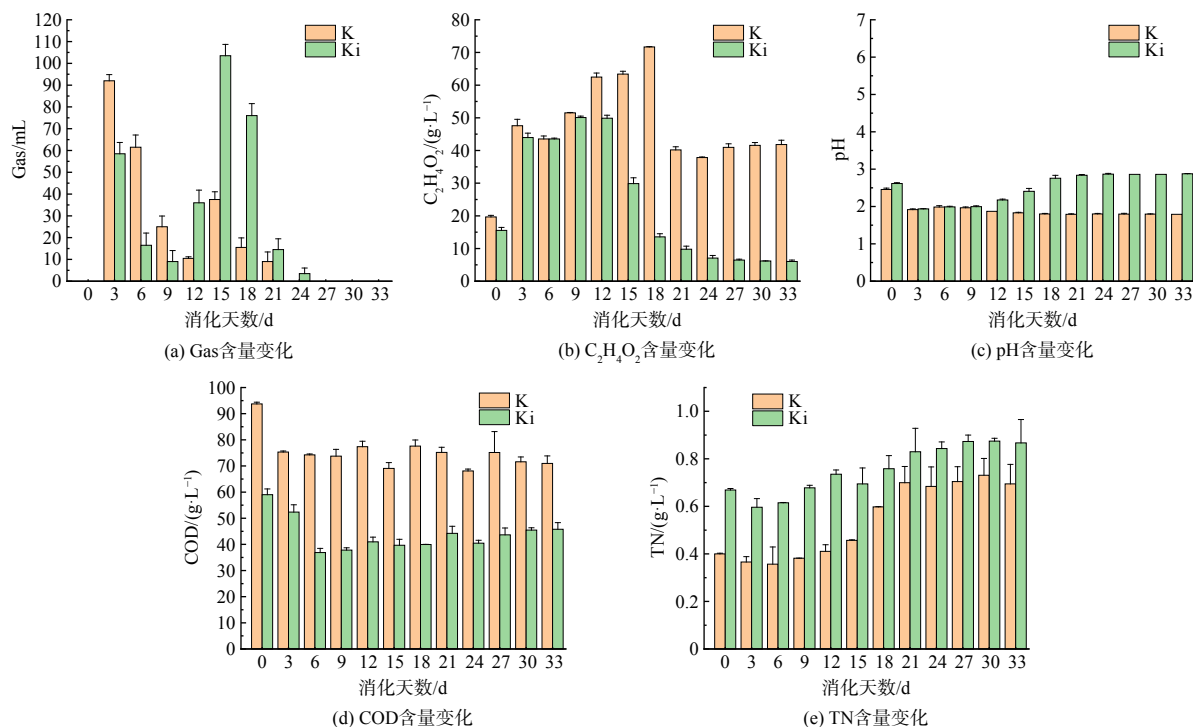
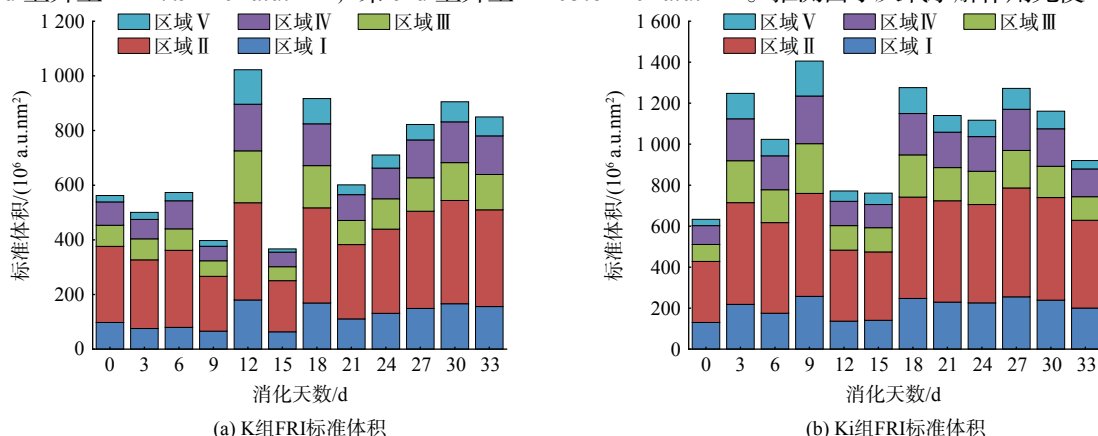


图 2 厌氧消化中各理化指标变化

Fig. 2 Dynamic variations of physiochemical parameters of the anaerobic digestion

2.2 FRI 分析

根据 FRI 计算方法得到 5 个区域的积分标准体积, 沼液中各采样点 FRI 组分的全过程变化如图 3 所示。从图 3(a) 各采样点标准体积来看, K 组在第 12、18 d 总标准体积分显著上升, 其中第 12 d 上升至 $1\,022.3 \times 10^6$ a.u.nm², 第 18 d 上升至 916.9×10^6 a.u.nm²; Ki 组在第 3、9 d 总标准体积分显著上升, 其中第 3 d 上升至 $1\,247.9 \times 10^6$ a.u.nm², 第 9 d 上升至 $1\,405.6 \times 10^6$ a.u.nm²。推测由于厌氧水解作用先使 DOM 溶



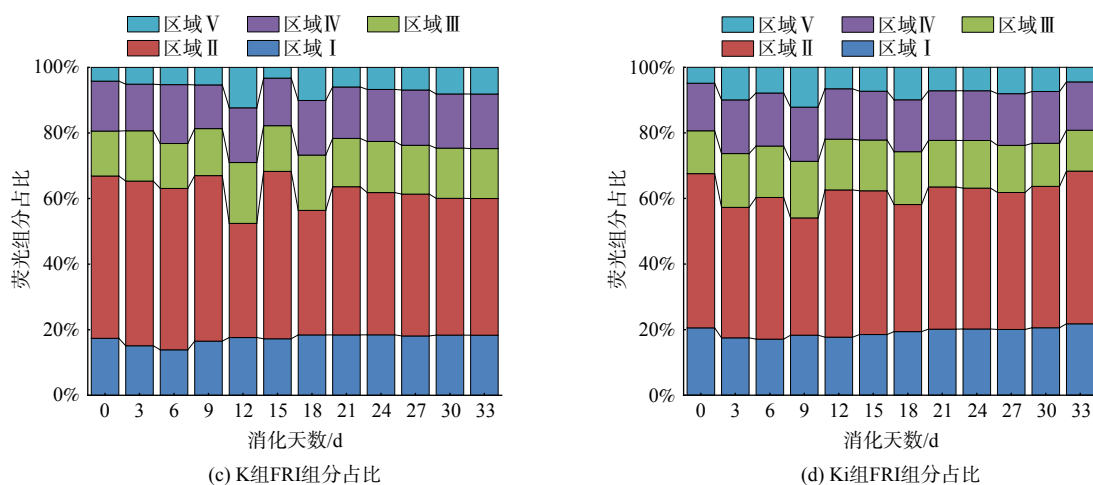


图 3 沼液中各采样点 FRI 组分的全过程变化

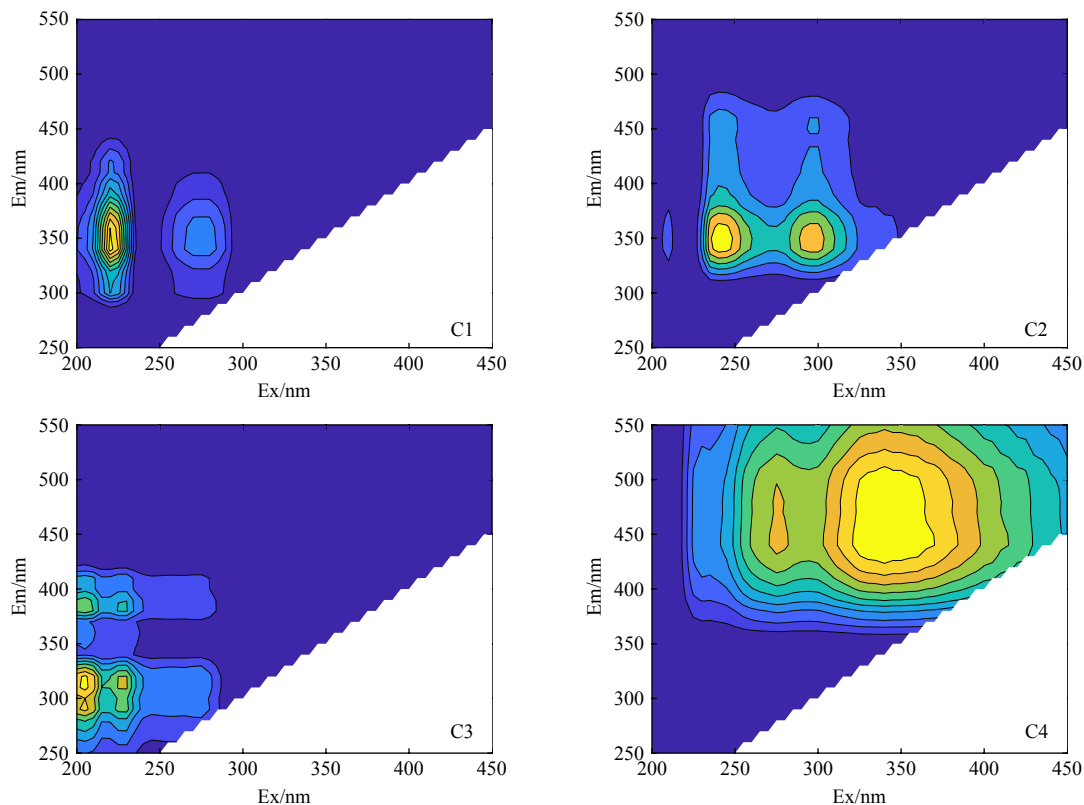
Fig. 3 Dynamic variations of FRI components in digestate of the anaerobic digestion

出增大, 厌氧细菌利用后造成物质下降。随着厌氧过程增加, 厌氧活性物质减小, DOM 利用速率减慢。对比 K 组和 Ki 组发现, 加入外源性物质的厌氧消化标准体积显著高于自身源物质, 因此, 加入外源性物质能够促进厌氧消化 DOM 的产生。

从图 3(b) 各采样点组分的相对丰度来看, 有机物的含量在各区域所占比例变化不大, 样品中区域 II 所代表的芳香类蛋白质 II 的含量较大, 其中 K 组占比在 35%~51%, Ki 组占比在 36%~47%。根据岳龙飞等^[14]的研究推断出两组样品中在消化周期内微生物活性均较弱。

2.3 PARAFAC 分析

基于 PARAFAC 模型对厌氧消化全过程中消化沼液的荧光数据进行分析, 确定最佳因子数为 4 个。消化沼液 DOM 中四组分荧光组分与对应载荷示意图如图 4 所示。厌氧消化的各个阶段, 其 DOM 组分可能相



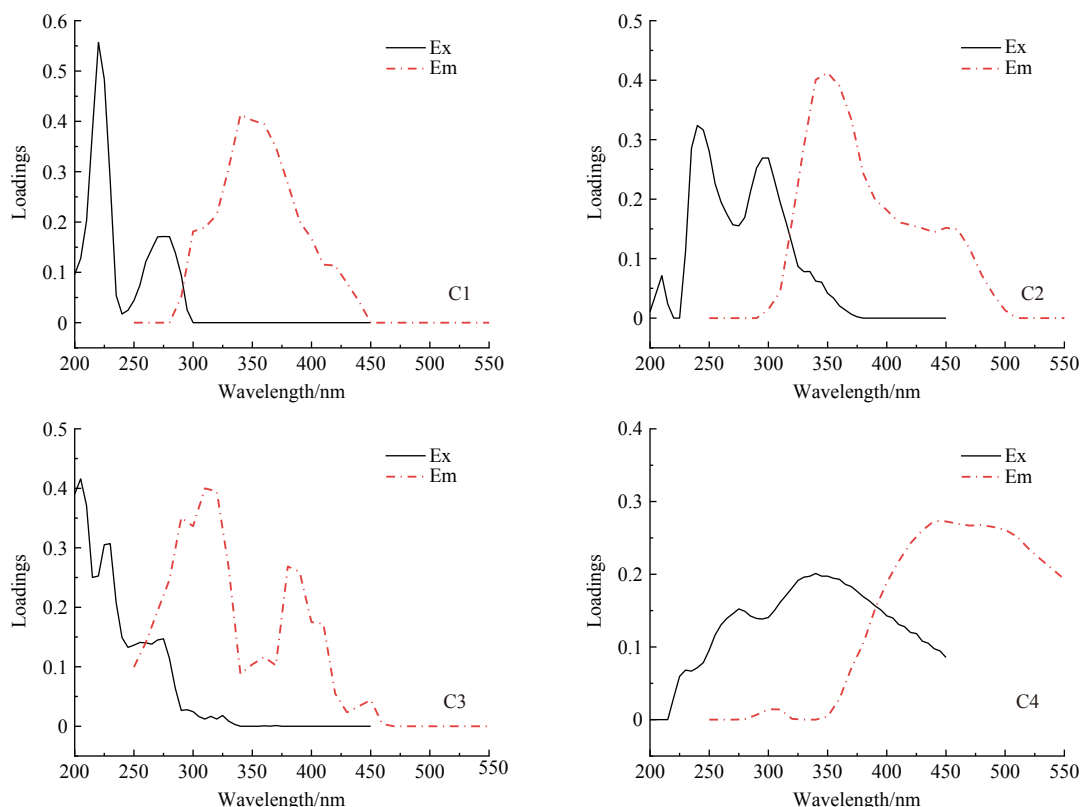


图 4 消化沼液 DOM 中四组分荧光组分与对应载荷

Fig. 4 DOM fluorescent components and corresponding loads in digestate of the anaerobic digestion

近,但组分强度会发生变化^[25]。表 2 中列举了 4 组分对应的大分子组分的对比结果。根据以往对荧光组分的研究,推断 C1 和 C3 组分为芳香类氨基酸,其中 C1 为类色氨酸, C3 为类酪氨酸,这类组分反映的是生物降解来源形成的荧光峰值,会受到生活污水和工业废水等外源输入的微生物影响^[26]。C2 和 C4 组分为类腐殖质物质,其中 C2 为类富里酸, C4 为陆源类腐殖质,这类组分反映的是河流输入及其携带的土壤溶解至水中的腐殖质,另外还包括水体内部浮游动植物及微生物经过细菌分解的残体^[27]。

表 2 4 组分对应的大分子物质

Table 2 Corresponding macromolecular substances to the four components of PARAFAC

组分	Ex:Em	大分子物质	对比数据
C1	220 (275):340	类色氨酸	235 (275):340 ^[28] ; 230 (275):340 ^[29] ; 275:340 ^[30]
C2	240 (300):350	类富里酸	<240:345 ^[31] ; 230~233, 280~320:340~420 ^[32] ; 230:340 ^[33]
C3	205 (225):310	类酪氨酸	<250:305 ^[34] ; 225 (275):311 ^[35] ; 270:306 ^[36]
C4	(270) 340:440	陆源类腐殖质	<285:450 ^[37] ; 275:440 ^[38] ; 350:440 ^[39]

平行因子解析各采样点的荧光强度如图 5(a) 所示。K 组的总荧光强度在第 6 d 达到最大值 18.9×10^3 A.U., 第 12 d 下降到 13.5×10^3 A.U. 后在第 27 d 上升到 18.4×10^3 A.U.; Ki 组的总荧光强度在第 6 d 达到 24.2×10^3 A.U., 第 15 d 下降到 18.1×10^3 A.U. 后在第 30 d 上升到 29.2×10^3 A.U.。从图 5(b) 各采样点组分的相对丰度来看,有机物的含量在各区域所占比例变化不大。C1 所代表的类色氨酸最多, K 组占比为 55%~72%, Ki 组占比为 54%~69%, 其次为 C3 代表的类酪氨酸, K 组占比为 11%~23%, Ki 组占比为 18%~33%。对比 K 组和 Ki 组发现,加入外源性物质的厌氧消化总荧光强度显著高于自身源物质,且芳香类氨基酸为主要溶解性有机质。因此,加入外源性物质的厌氧消化能够促进 DOM 的产生。

2.4 相关性分析

为明确各组 DOM 的特征差异,对 DOM 组分及理化参数进行 Pearson 相关性分析如图 6 所示。分析结

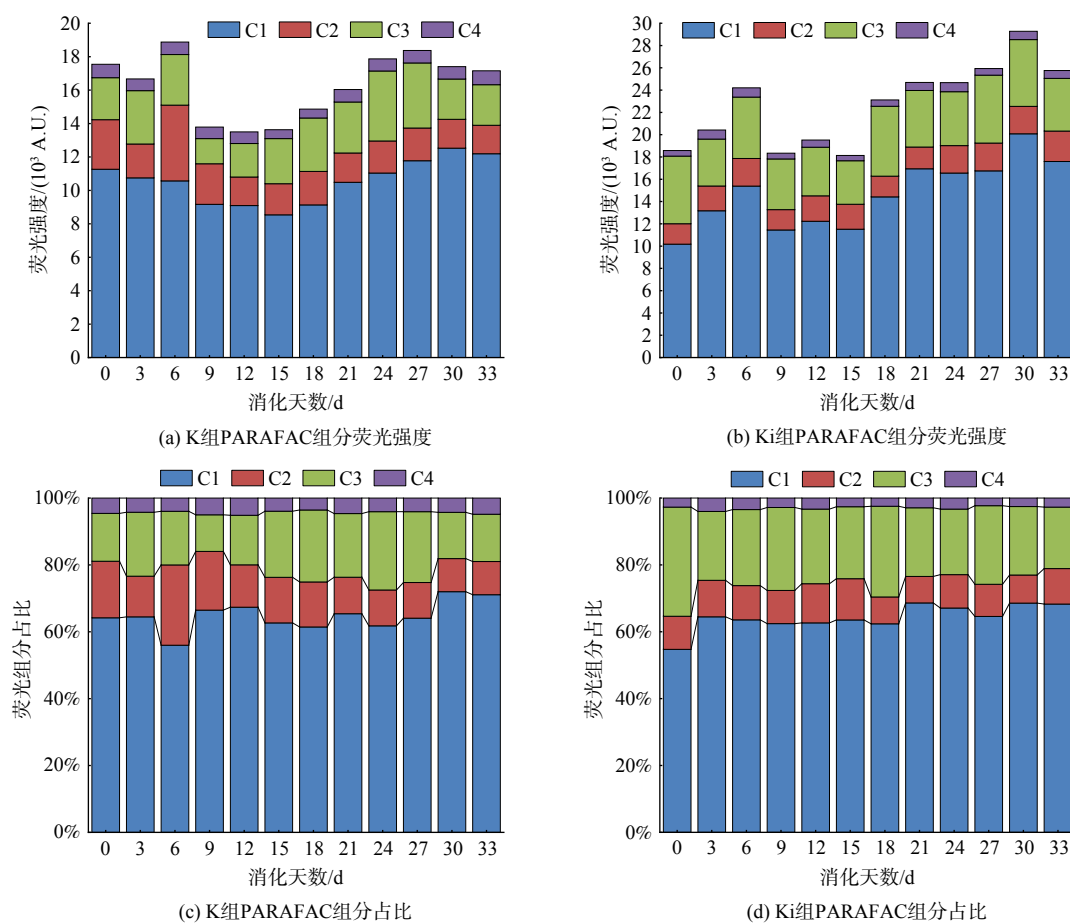
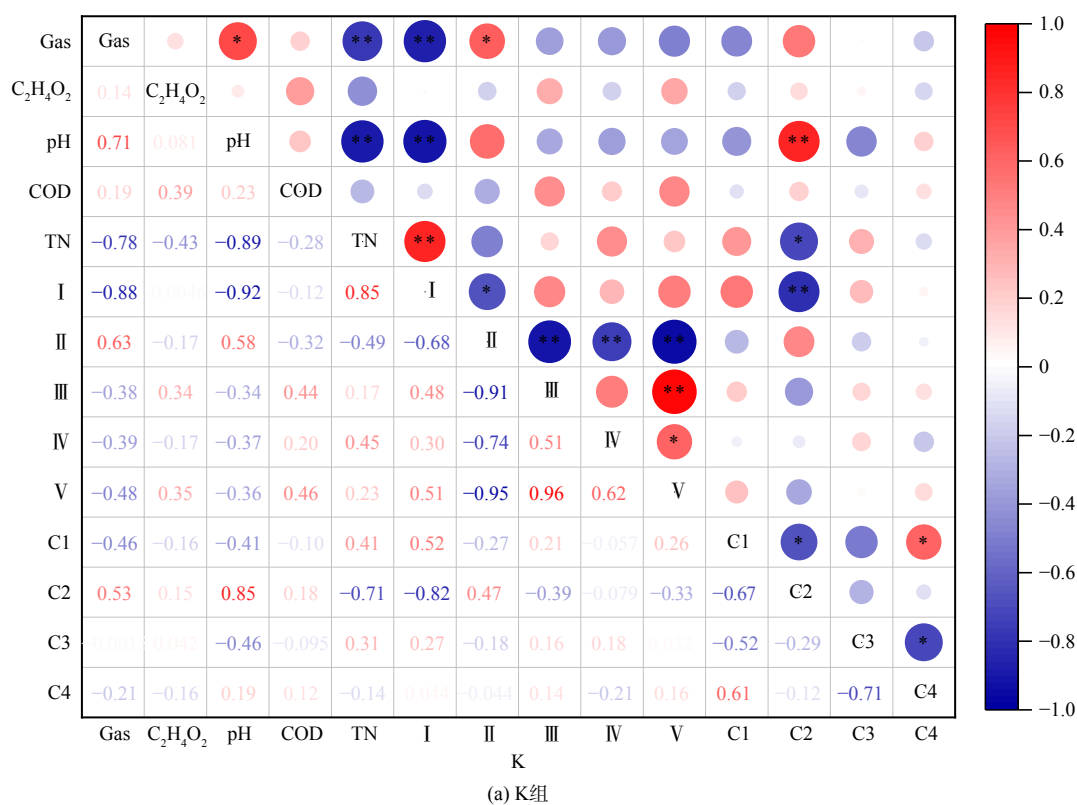
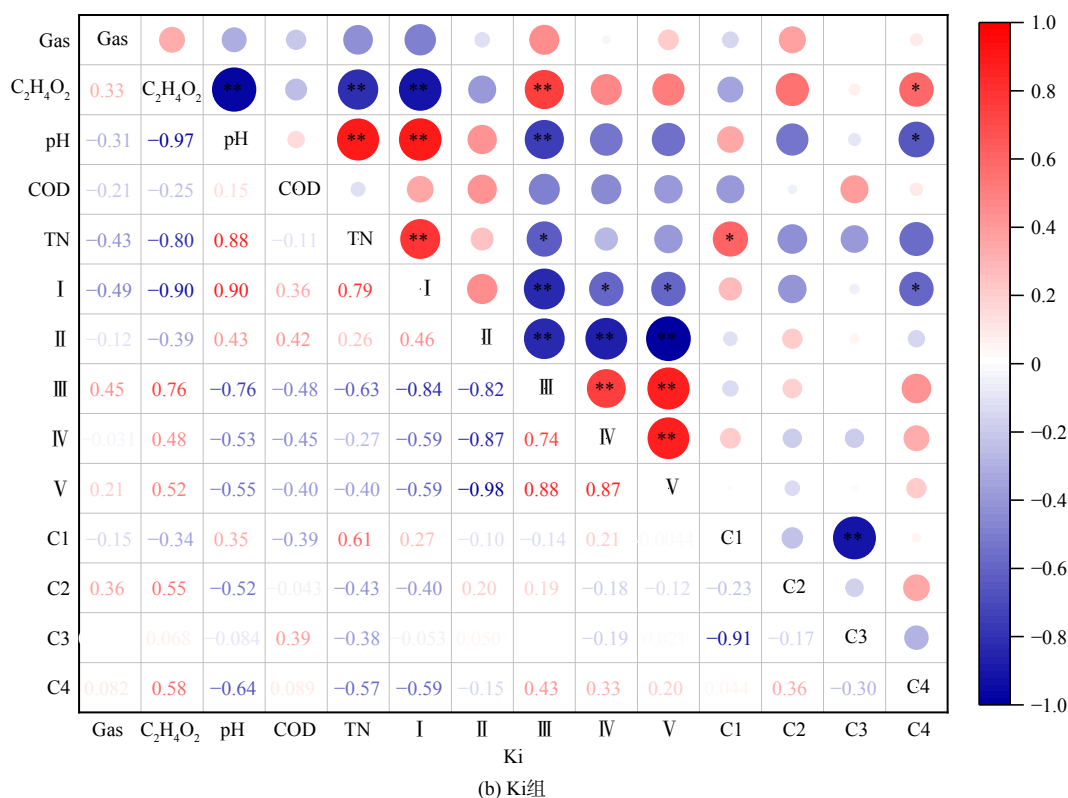


图5 沼液中各采样点 PARAFAC 组分的全过程变化

Fig. 5 Variation of the PARAFAC components in digestate of the anaerobic digestion





注: *表示在 $P < 0.05$ 水平下相关性显著, **表示在 $P < 0.01$ 水平下相关性显著; 图中圆形直径越大颜色越深表示相关性越强, 蓝色系表示相关性系数为负, 红色系表示相关性系数为正。

图 6 DOM 组分与理化参数的相关性

Fig. 6 Correlation of DOM components with physicochemical parameters

果表明, 在 K 组中 C2 组分的百分含量与 TN、pH、区域 I 的百分含量呈现显著相关关系, 区域 I 还与 Gas、pH 和 TN 含量呈现显著相关关系, 并且区域 II 与 Gas 呈显著相关关系。在 Ki 组中, C4 组分的百分含量与 C₂H₄O₂、pH 和区域 I 含量呈现显著相关关系, 区域 I 还与 C₂H₄O₂、TN、pH 呈现显著相关关系。FRI 分析出区域 I 的百分含量与 TN 和 pH 在 2 组样品中均呈现显著相关关系, 其中与 TN 均呈正相关关系, 而 PARAFAC 分析中没有共同的显著相关关系出现。分析结果表明, 用沼液中 DOM 的荧光指数变化情况可以反映 TN 含量和 C₂H₄O₂ 含量等, 可以作为沼液监测的一种快速高效的方法。

3 结论

1) 热水解后的剩余污泥加入餐厨垃圾厌氧消化体系相比热水解后餐厨垃圾的加入, 达到最大产乙酸量的消化时间可缩短一半。

2) FRI 与 PARAFAC 分析可揭示消化沼液中 DOM 的组分及其含量动态变化, 结果表明加入热水解后的剩余污泥能促进厌氧消化 DOM 的产生。

3) TN 含量与 FRI 分析出的芳香类蛋白质 I 有显著正相关关系, 可以利用三维荧光光谱技术结合 FRI 有效地表征沼液中 TN 的变化。

参考文献

- [1] DING Y, ZHAO J, LIU J W, et al. A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293: 126144.
- [2] 宋壮壮, 张智, 孔赞, 等. 剩余污泥和餐厨垃圾协同厌氧消化处理研究[J]. *给水排水*, 2023, 59(5): 37-43.
- [3] 段娜, 刘倩如, 郑鑫, 等. 沼液酸化贮存技术研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(11): 208-218.
- [4] FULDAUER L I, PARKER B M, YAMAN R, et al. Managing anaerobic digestate from food waste in the urban environment: Evaluating the feasibility from an interdisciplinary perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 185: 929-940.

- [5] ZHANG Y, ZHANG P, GUO J, et al. Spectroscopic analysis and biodegradation potential study of dissolved organic matters in sewage sludge treated with high-pressure homogenization[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 135: 616-621.
- [6] DU H, GAO W, LI J, et al. Effects of digested biogas slurry application mixed with irrigation water on nitrate leaching during wheat-maize rotation in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 882-893.
- [7] 杨臣强, 杨瑞, 于玉洁, 等. 基于三维荧光光谱-平行因子分析及紫外-可见吸收光谱对制药污水不同处理工艺单元溶解性有机物特征分析[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(10): 3444-3453.
- [8] ARTINGER R, BUCKAU G, GEYER S, et al. Characterization of groundwater humic substances: Influence of sedimentary organic carbon[J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15(1): 97-116.
- [9] PAULA G, COBLE. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 1996, 51(4): 325-346.
- [10] 要世瑾, 杜光源, 牟红梅, 等. 核磁共振技术在土壤-植物-大气连续体研究中的应用[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 315-326.
- [11] 刘晗青, 郭寅龙. 傅立叶变换-离子回旋共振质谱法在蛋白质分析中的应用[J]. *质谱学报*, 2003, 24(2): 363-369.
- [12] 罗月萱, 吕泽兰, 晏彩霞, 等. 袁河流域沉积物中溶解性有机质的光谱特征[J]. *环境科学*, 2024, 45(8): 4553-4564.
- [13] 敖静, 王涛, 常瑞英. 三维荧光光谱法在土壤溶解性有机质组分解析中的应用[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3): 738-746.
- [14] 岳飞龙, 李洪波, 梁淑轩, 等. 白洋淀入淀河流溶解有机物沿程变化特征及来源解析[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(3): 1050-1060.
- [15] 隋志男, 郅二铨, 姚杰, 等. 三维荧光光谱区域积分法解析辽河七星湿地水体 DOM 组成及来源[J]. *环境工程技术学报*, 2015, 5(2): 114-120.
- [16] 高连敬, 杜尔登, 崔旭峰, 等. 三维荧光结合荧光区域积分法评估净水厂有机物去除效果[J]. *给水排水*, 2012, 48(10): 51-56.
- [17] 姜新佩, 姚杰, 张欢. 三维荧光区域积分法评估不同植物对溶解性有机物去除效果[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(7): 276-279.
- [18] 申钊颖, 弓晓峰, 江良, 等. 利用荧光区域积分法解析鄱阳湖 DOM 组成及来源[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(5): 196-203.
- [19] 万鹏亮, 刘玉玲, 朱妮平, 等. A³O 工艺处理城市污水过程中 DOM 组分变化分析[J]. *西安建筑科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, 53(5): 765-772.
- [20] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(24): 5701-5710.
- [21] STEDMON C A, BRO R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial: Fluorescence-PARAFAC analysis of DOM[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, 6(11): 572-579.
- [22] MURPHE K R, STEDMON C A, GRAEBER D, et al. Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC[J]. *Analytical Methods*, 2013, 5(23): 6557.
- [23] CHE J G, LIN W F, YE J, et al. Insights into compositional changes of dissolved organic matter during a full-scale vermicomposting of cow dung by combined spectroscopic and electrochemical techniques[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301: 122757.
- [24] HUGUET A, VACHER L, RELEXANS S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(6): 706-719.
- [25] ZHANG R, XIAN R, WANG F, et al. Direct discharge of sewage to natural water through illicitly connected urban stormwater systems: An overlooked source of dissolved organic matter[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 890: 164248.
- [26] 江俊武, 李帅东, 沈胤胤, 等. 夏季太湖 CDOM 光学特性空间差异及其来源解析[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(7): 1020-1030.
- [27] 倪茂飞, 刘睿, 王志康, 等. 典型喀斯特河流汛期溶解性有机质空间变化及其光学参数的耦合关系[J]. *生态学报*, 2022, 42(7): 2822-2833.
- [28] 许明, 刘伟京, 白永刚, 等. 太湖蓝藻水华期可溶有机物的生物降解[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(9): 3494-3501.
- [29] YANG B, GAO X, ZHAO J, et al. The impacts of intensive scallop farming on dissolved organic matter in the coastal waters adjacent to the Yangma Island, North Yellow Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 150989.
- [30] QI L, XIE H, GAGNE J P, et al. Photoreactivities of two distinct dissolved organic matter pools in groundwater of a subarctic island[J]. *Marine Chemistry*, 2018, 202: 97-120.
- [31] FU P, WU F, LIU C, et al. Fluorescence characterization of dissolved organic matter in an urban river and its complexation with Hg(II)[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(8): 1668-1679.
- [32] 刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 等. 渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1198-1208.
- [33] 蔡文良, 许晓毅, 杜娟, 等. 嘉陵江重庆段 DOM 三维荧光光谱的平行因子分析[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(3): 276-281.
- [34] 黄凯文, 马珍, 苦君月, 等. 喀斯特山区土壤溶解性有机质光谱特征及来源解析[J]. *环境工程*, 2023, 41(5): 115-124.
- [35] 王筱, 晏彩霞, 聂明华, 等. 紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制[J]. *环境科学*, 2023, 44(11): 6159-6171.
- [36] 程远月, 郭卫东. 厦门湾有色溶解有机物光漂白的三维荧光光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(4): 990-993.
- [37] LIAO Z, WANG Y, XIE K, et al. Photochemistry of dissolved organic matter in water from the Pearl River (China): Seasonal patterns and predictive modelling[J]. *Water Research*, 2022, 208: 117875.
- [38] 申慧彦, 曹承泽, 王嘉富, 等. 典型可溶性有机质组分与土霉素荧光猝灭研究[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(5): 201-207.
- [39] 申慧彦, 徐华健, 王嘉富, 等. 湖滨带土壤长期淹水释放 DOM 与抗生素的猝灭作用[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(1): 366-376.

(责任编辑: 陶雪)

Effects of exogenous substances on the spectral characteristics of DOM in digested biogas slurry

YU Yiqiong, ZHOU Cuihong, FENG Shugeng*, ZHANG Mingyu, WANG Menghan

Department of Environmental Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

*Corresponding author, E-mail: fengshugeng@bipt.edu.cn

Abstract Anaerobic digestion of kitchen waste for acidogenesis is one of the most promising technologies for recycling resources and recovering energy for better sustainable development, however, high yields of digestate constrains the development of this technology, rendering proper treatment of digestate a stranglehold problem, which is fundamentally dependent upon fast and accurate determination of compositions and corresponding abundances in digestates. This study used three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with fluorescence region integration (FRI) and parallel factor (PARAFAC) methods to investigate different effects of exogenous and self-derived substances on fluorescence components and intensities of dissolved organic matter (DOM) in digestate as well as acid production performance along kitchen waste digestion. The results indicated that adding exogenous substances to kitchen waste digestion could accelerate production of acetic acid and DOMs in the digestate. Total nitrogen in digestate was significantly and positively correlated with the FRI-revealed aromatic protein I. Both FRI and PARAFAC could accurately reveal the DOMs' categories in digestate and indicate the dynamic variations of each component. The results could provide a theoretical reference for enhancing kitchen waste anaerobic digestion and value-added digestate recycling utilization.

Keywords anaerobic digestion; kitchen waste; dissolved organic matter; fluorescence regional integration; parallel factor analysis