

陈毅强,蒋 栩,侯 俊,等.不同曝气梯度对腐殖土中 DOM 的释放影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1465-1473.

Chen Y Q, Jiang X, Hou J, et al. The impact of different aeration gradients on the release of DOM in humic soil [J]. China Environmental Science, 2025,45(3): 1465-1473.

不同曝气梯度对腐殖土中 DOM 的释放影响

陈毅强¹,蒋 栩^{1,2},侯 俊²,苗令占^{2*} (1.江苏省环境工程技术有限公司,江苏 南京 210098; 2.河海大学环境学院,浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要: 为探讨不同曝气梯度对腐殖土中溶解性有机物(DOM)释放的影响,以揭示腐殖土释碳性能及其在污水处理中的应用潜力,本研究通过设置无曝气,低曝气,中曝气和高曝气 4 种梯度,开展 600h 的释碳实验,利用总有机碳(TOC)分析,三维荧光光谱-平行因子分析(EEM-PARAFAC)及紫外-可见光吸收光谱法,检测各时间点的释碳量及 DOM 组分变化.结果显示:曝气强度显著影响腐殖土的释碳量及周期,在中曝气量之前释碳量随曝气强度增加而增加,超过中曝气量后反而减少.曝气因素对芳香蛋白类物质 I(C1)与富里酸物质(C3)的释放起到了促进效果,但是对这两种组分的促进强度与效果存在差异,曝气因素对芳香蛋白类物质 II(C2)与溶解性微生物代谢产物(C4)的释放起到了抑制效果,并且对这两种组分的抑制效果与强度同样存在差异.紫外-可见光吸收分析表明,腐殖土释碳过程中 DOM 的芳香性和腐殖化程度随时间增加.在 600h 的试验周期内,腐殖土释碳周期约为 248h,较高的曝气强度有助于提高 DOM 的微生物利用率.

关键词: 腐殖土; 溶解性有机物; 曝气强度

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)03-1465-09

The impact of different aeration gradients on the release of DOM in humic soil. CHEN Yi-qiang¹, JIANG Xu^{1,2}, HOU Jun², MIAO Ling-zhan^{2*} (1.Jiangsu Environmental Engineering Technology Co., Ltd, Nanjing 210098, China; 2.Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China). *China Environmental Science*, 2025,45(3): 1465~1473

Abstract: To unveil the carbon release capacity of humic soil and its potential applications in wastewater treatment, this study explored the impact of various aeration gradients on the release of dissolved organic matter (DOM) from humic soil. By establishing gradients of no aeration, low aeration, medium aeration, and high aeration, the carbon release experiment lasting 600 hours was conducted. The carbon release capacity at various time points and DOM changes in components were monitored with the aid of total organic carbon (TOC) analysis, three-dimensional fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis (EEM-PARAFAC), and UV-visible absorption spectroscopy. Results showed that aeration intensity significantly affected the amount and cycle of carbon release from humic soil. Before reaching medium aeration, the carbon release capacity increased with the intensity of aeration, followed by a decrease afterwards. Aeration was found to enhance the release of aromatic protein-like substance I (C1) and humic-like substances (C3). However, the intensity and effectiveness of the enhancement varied between these two components. Conversely, aeration suppressed the release of aromatic protein-like substance II (C2) and soluble microbial metabolic substances (C4), where differences were also observed. UV-visible absorption analysis indicated that the aromaticity and humification degree of DOM increased over time during the carbon release process from humic soil. The carbon release cycle was about 248h during the 600-h test, higher aeration intensities were found to improve the microbial utilization of DOM.

Key words: humic soil; dissolved organic matter; aeration intensity

腐殖土是由高含量的腐殖质组成的土壤,腐殖质本身则由植物,动物残体及生物分解物经过复杂的微生物作用和化学转化形成的高分子有机复合物^[1-2].腐殖质在土壤中的累积是一种自然的碳储存机制,对于调控大气 CO₂ 水平具有显著影响^[3].腐殖土起初多用于在农业,园艺等领域,因为它有助于改善土壤质量,促进植物生长^[4-5].目前研究发现其在污水处理领域的作用日益显著,能为微生物提供其所

需要的营养物质与生长繁衍所需要的载体,同时实现污泥减量^[6-7].

2020 年中国污泥产生量超过 7200 万 t,到 2025 年将达到 9000 万 t^[8].腐殖活性污泥法是实现污泥减

收稿日期: 2024-08-06

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0100900);江苏省自然科学基金资助项目(BK20230763);江苏省科协青年科技人才托举工程(JSTJ-2023-XH022)

* 责任作者, 教授, lzmiiao@hhu.edu.cn

量的有效途径,主要包括 3 部分内容:1)增强有机碳的“气化”反应过程.废水中的有机物,衰亡的微生物在进行腐殖化反应的过程中,会伴随有机碳的“气化”(指有机碳被转化成 CO_2 后释放到大气中),使生化系统内总碳量减少^[9].生化系统内的腐殖化反应过程和微生物的异化代谢过程(代谢产物为 CO_2 , H_2O 和 ATP 或热量)比较类似,不同的是微生物异化作用是一种生命代谢活动过程,而腐殖化反应是一种非生命活动过程,腐殖土的污泥减量作用强化了生化系统内底物的异化代谢过程^[10].相关研究在腐殖土序批式活性污泥法(HS-SBR)工艺中观察到污泥产量为 $0.18\text{mgMLVSS/mgSCOD}$,与传统的序批式活性污泥法(SBR)工艺相比,固体产量减少了 24%^[11].2)强化微生物处理能力.腐殖活性污泥法将二沉池和污泥浓缩池中的部分污泥导入腐殖土反应器,使其与腐殖质填料充分接触并促进腐殖化^[12].此过程改变了活性污泥的微生物群落结构,使微生物数量显著增多,增强了微生物处理能力^[13].腐殖活性污泥工艺应用于韩国屠宰废水和粪便的处理^[14],总氮和总磷去除率可达 90%,有效减轻了后续污水处理厂的处理负荷.3)提高污泥脱水性能.生化系统内腐殖化反应的大量发生,会改善活性污泥的脱水性能,使污泥更容易脱水,具体表现为在不增加污泥脱水设备能耗和药剂使用量的前提下,脱水后的泥饼含水率相对更低^[15].将浓度为 5.0g/L 腐殖土的投加至浓度为 2300mg/L 的活性污泥,发现污泥容积系数(SVI)可由原来的 152mL/g 降至 61mL/g ,毛细吸水时间(CST)由原来的 20.3s 降至 15.7s ,显著改善污泥的沉降和脱水性能^[16].综上,腐殖土活性污泥法在污泥减量和碳减排方面发挥着关键作用,具有良好的应用前景,受到国内外学者的广泛关注^[17-19].

尽管已有部分研究探讨了曝气对土壤有机质分解的影响,可显著提高过氧化氢酶,碱性磷酸酶和脲酶活性,以及增强土壤微生物多样性^[20],通过优化曝气条件能够提升常规污染物和微塑料的协同去除效率^[21].但目前尚不清楚不同曝气梯度对腐殖土中溶解性有机物释放的影响机制.因此,本文模拟污水处理厂中不同曝气程度环境,通过研究腐殖土的 DOM 释放效果以及释碳组成,分析腐殖土中不同成分的 DOM 释放速率.腐殖土释放的 DOM 物质组成复杂,功能特性多样^[22-23].通过设置多个曝气梯度实

验(涵盖厌氧、缺氧、好氧和强好氧环境,模拟实际污水处理工艺如厌氧消化、A/O、氧化沟和纯氧曝气),本研究利用多种分析手段评估腐殖土的释碳能力及其组成,旨在为筛选高性能腐殖土材料提供理论依据,优化污水处理工艺,平衡处理效果与能耗,提升氮磷去除效率及污泥沉降性,从而提高污水处理厂的整体运行效能.

1 材料与方法

1.1 材料准备

该实验选取腐殖土颗粒剂作为实验材料,由腐殖土柱经研磨,过 60 目筛制得.称量 15g 腐殖土,将腐殖土和纯水以 1:100 的质量比置入曝气装置内,开展 DOM 释放性能实验.

1.2 释放性能实验

采用 4 个相同的曝气装置,依次设置为无曝气($\text{DO} \leq 2\text{mg/L}$),低曝气($2 < \text{DO} \leq 4\text{mg/L}$),中曝气($4 < \text{DO} \leq 6\text{mg/L}$)和高曝气($\text{DO} > 6\text{mg/L}$)的曝气梯度,之后放入称量好的腐殖土与纯水,开展释放性能试验.分别于 8,16,24,32,40,48,56,72,80,96,104,128,152,200,248,320,392,480,600h 时间段对 4 个锥形瓶内的缓释液进行取样分析,并及时补充纯水.将收集到的 19 个时间段的水样,分别采用 TOC 仪,三维荧光光谱仪与紫外可见分光光度计检测水样内部的 DOM 组分种类与含量.

1.3 溶解性有机物的测定

表 1 DOM 各类组分的检测方法及检测仪器

Table 1 Detection methods and equipment of different DOM components

序号	指标	方法	仪器
1	TOC	燃烧法	TOC 仪
2	DOM 芳烃含量	紫外线吸收率(SUVA ₂₅₄)等	紫外可见光光度计
3	DOM 组分与含量	检测荧光基团	三维荧光光谱仪

1.3.1 检测方法及仪器 DOM 是一类可通过 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜,具有复杂结构的可溶性有机混合物^[24].通常采用紫外—可见吸收光谱法^[25]和三维荧光光谱法^[26]分析液体中的 DOM 组分.水体中 DOM 的检测方法及仪器见表 1.该实验中所有样品均采用 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜进行过滤.使用岛津总有机碳分析仪(TOC-VCPh)测定液体中的 TOC 浓度,采用 Origin

软件进行数据分析,动态拟合和图形绘制,揭示腐殖土的释碳规律.

1.3.2 三维荧光光谱-平行因子分析法 三维荧光光谱-平行因子分析法(EEM-PARAFAC)具有经济,高效,选择性强,灵敏度高且不破坏样品结构等优势,能够有效分析 DOM 的结构组成^[27-28].使用荧光光谱仪(F-7000FL,Hitachi,Japan)测定浸出液的三维荧光光谱,测定时参数设置如下:发射波长(E_m)250~550nm,间隔 1nm,激发波长(E_x)200~450nm,间隔 5nm, E_x 和 E_m 狭缝宽度设定均为 5nm.该研究以超纯水扣除空白,并使用拉曼积分将荧光强度归一化为拉曼单位(R.U.)以消除拉曼散射影响,之后采用光谱耦合平行因子分析(EEM-PAEAFAC)用于表征水体中 DOM 荧光组分.使用 MATLABR2021b 软

件(Mathworks,USA)和 DOMFlor 工具包(http://www.models.life.ku.dk/al_domflor)建模处理 EEM 光谱数据,对数据进行 PARAFAC 分析,通过拆半检验后提取荧光组分,并使用 OpenFlour 数据库(<https://openflour.lablicate.com/>)比对分析各组分.建模过程包括以下步骤:(1)排除水散射,(2)应用非负约束,(3)考虑载荷杠杆,(4)识别和去除异常值(如果存在),(5)进行拆半检验以确定合适的成分数量^[29].采用三维荧光光谱-平行因子分析法,使用 MATLAB-R2021b 软件(Mathworks,USA)绘制出腐殖土在 4 类溶解性有机碳下的荧光含量图,以高曝气腐殖土释放的 4 种荧光组分为例,使用 PARAFAC 分析解析腐殖土释放的四种荧光组分见图 1,通过荧光图进一步分析腐殖土中四类 DOM 的释放情况.

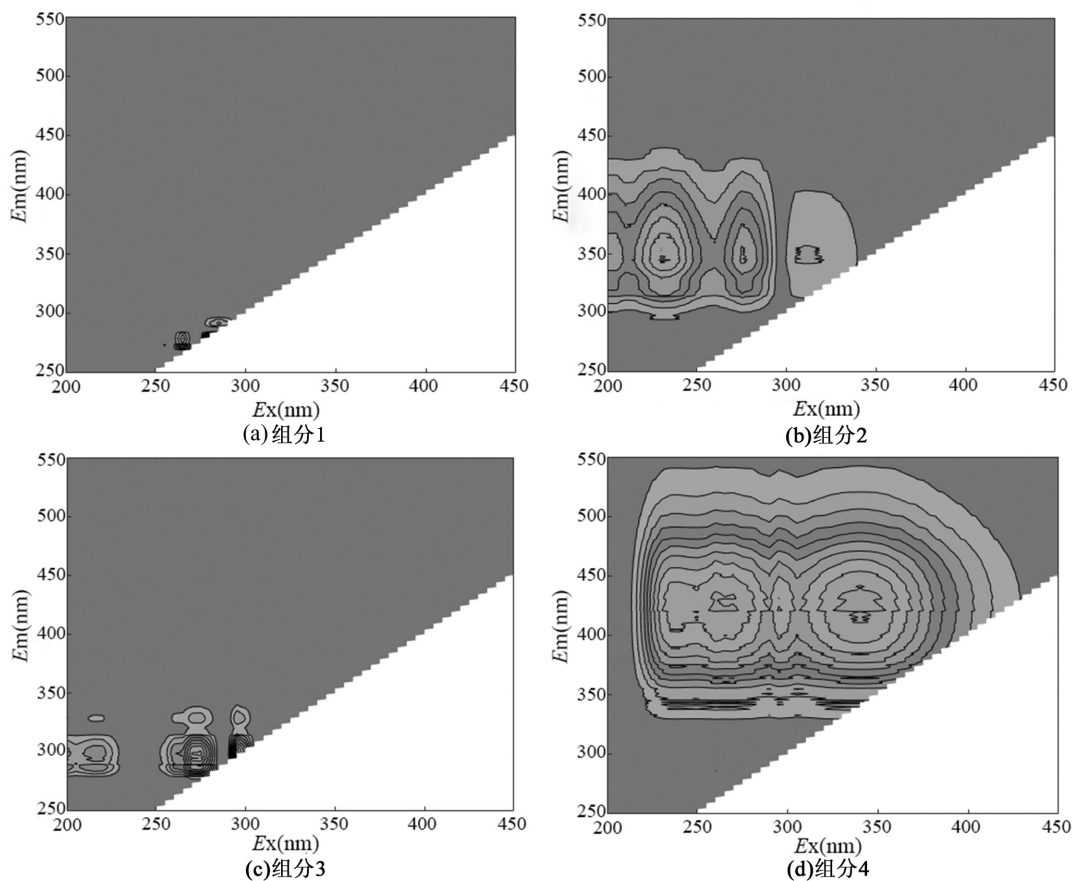


图 1 使用 PARAFAC 分析解析腐殖土释放的 4 种荧光组分

Fig.1 Four fluorescence fractions of humic soil resolved using PARAFAC analysis

1.3.3 紫外可见光吸收光谱法 紫外可见光吸收光谱法可以测量 a_{254} , a_{280} , 单位有机碳含量吸光度 $SUVA_{254}$, 吸光系数比值 $E2/E3$ 等指标.过滤后浸出液

的紫外-可见吸收光谱(UV-vis)采用紫外可见分光光度计(岛津 UV-1800,Japan)测定,扫描波长范围设置在 200~800nm,采用 1nm 间隔进行扫描,以 Milli-Q

的超纯水作为空白对照,其吸收系数计算公式如下:

$$a_{\lambda} = 2.303 \times (A_{\lambda} - A_0) / L \quad (1)$$

式中: a_{λ} 为指定波长 λ 处的吸收系数, m^{-1} ;L为光的传播路径长度,即比色皿宽度,m,该研究中为 0.01m; A_{λ} 为指定波长 λ 处的吸光度; A_0 为指定波长 λ 处超纯水的吸光度.

表 2 4 类 DOM 组分的代表类型以及荧光范围

Table 2 Representative types and fluorescence ranges of four

DOM components

区域	范围 Ex/Em	代表的物质类型
C1	220nm~250nm/	芳香蛋白类物质 I
	280nm~330nm	
C2	220nm~250nm/	芳香蛋白类物质 II
	330nm~380nm	
C3	220nm~250nm/	富里酸类物质
	380nm~500nm	
C4	250nm~280nm/	溶解性微生物代谢产物

2 结果与讨论

2.1 不同曝气梯度腐殖土释放总有机碳(TOC)的浓度变化

由图 2 可见,处在低曝气,中曝气,高曝气环境下的腐殖土的 TOC-t 曲线变化情况较为相似,均为在 16h 处达到一个小高峰,在 16~128h,腐殖土对 TOC 的释放浓度在一定区间范围内上下波动,在 128h 处达到第二个高峰,可能与微生物群落在适应新环境后的活跃期和代谢产物积累到一定程度后的再次活跃有关.在 128~400h,腐殖土的 TOC 释放强度急速下降,在 400h 之后逐渐趋向于稳定.然而处在无曝气环境下的腐殖土,其 TOC 释放强度在 8h 处释放含量最大,达到了 8mg/L,在 8h 之后,

其释碳能力急速下降,在 80h 后其释碳能力逐渐趋于稳定.这可能说明在无氧条件下,微生物利用腐殖质中的易分解有机物较快,但由于缺乏氧气,其后续的降解能力受限,导致 TOC 释放速度快速下降.

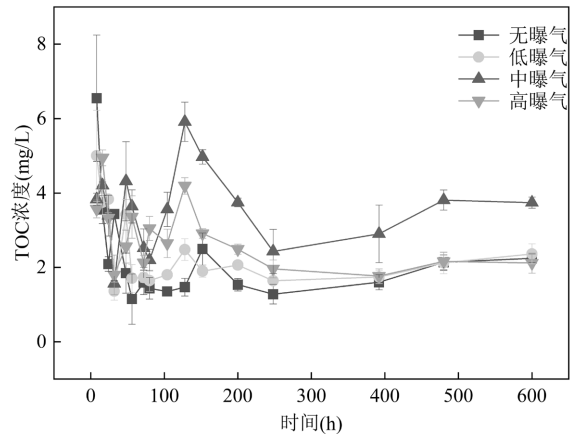
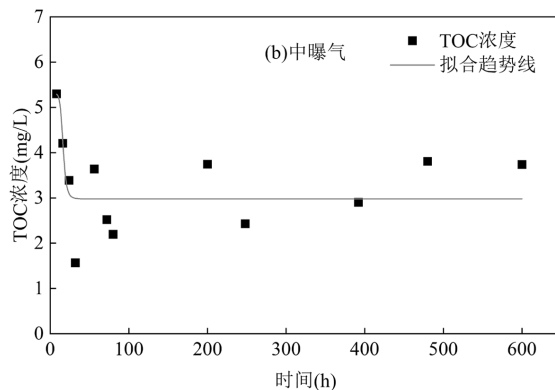
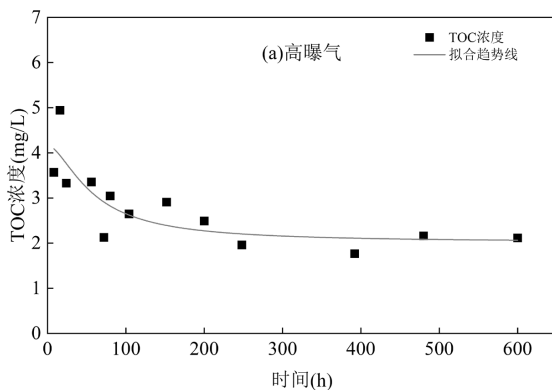


图 2 不同曝气梯度下的腐殖土在 0~600h 内的 TOC 变化
Fig.2 TOC variations of humic soil under various aeration gradients during 0~600h

由图 3 可见,在 0~32h 处腐殖土释碳速率的大小顺序为:无曝气>中曝气>低曝气>高曝气,在 32~100h 处腐殖土释碳速率的大小顺序为:高曝气>低曝气>中曝气>无曝气.100h 后水中的 TOC 浓度均趋于稳定.综上可知:1)曝气因素的介入,会影响腐殖土的释碳强度以及释碳周期.2)在中曝气量之前,曝气强度越大,释碳量越大;超过中曝气之后,曝气强度越大,释碳量反而越小.推测是高曝气量加速了将液相中的 TOC 向气相中转移的过程,增加气泡活动和表面扰动促进了更多的碳从水相逸出至气相^[30].



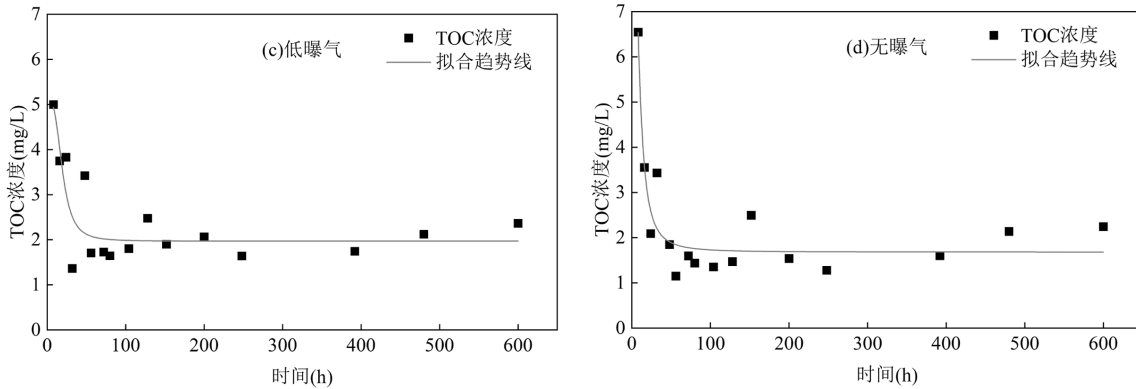


图3 不同曝气梯度下腐殖土的释碳动力学曲线

Fig.3 Kinetic curves of carbon release from humic soil under various aeration gradients

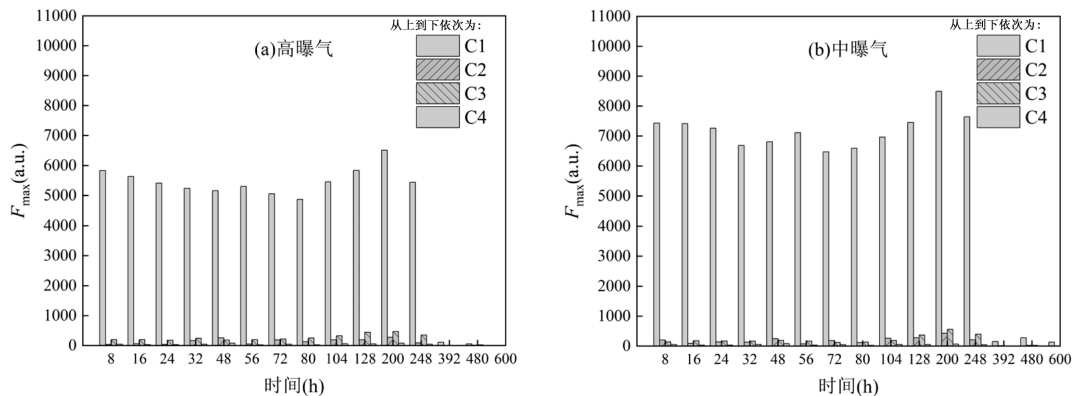
2.2 腐殖土释放 DOM 中荧光组分的相对含量变化

图4为根据EEM结果所得最大荧光强度(F_{max}), 绘制出的释碳平行因子分析图^[31].由图4可知,随着时间的增加,4种曝气梯度下组分C1的荧光强度均最强,组分C2和C3的最大荧光强度随时间的变化情况基本一致,在0~200h内呈现出逐渐上升的趋势,在200h之后急速下降,在600h时已趋近于0.组分C4的荧光强度变化有所差异,具体表现为,在0~200h时间段内,C4的荧光强度处于上下波动状态,200h之后其荧光强度急速下降.C1组分的最大荧光强度相较于其他3个组分的最大荧光强度有着绝对的优势,其在低曝气时相对最高,为10021.04,组分C2在无曝气时相对最高,为1933.20,组分C3在低曝气时相对最高,为994.31,组分C4在无曝气时相对最高,为135.62.

由图5可见,组分C1的占比极高,在392h内其占比几乎都在89%以上,占比最高时达到了95%,这说明芳香蛋白类物质I是腐殖土释放的主要物质,与其他组分相比具有更强的释放强度和持久性.曝气因素的介入增大了C1组分的释放强度,但并非曝

气量越大,C1组分的释放强度越大.曝气因素的介入不会改变C1组分随时间而释放的规律.这表明氧气供应和微生物代谢路径的复杂性,可能影响了芳香蛋白类物质的释碳效率.无曝气时组分C2的占比仅次于C1,在600h时间的内其占比普遍在22%以上,而低曝气时C3占比仅次于C1且普遍在5%以上.组分C4的占比大小随时间的变化较为稳定,占比变化普遍控制在1%以内.值得注意的是,在600h之后,组分C4的占比逐渐升高,推测是培养出利用DOM作为碳源进行代谢的微生物^[32].

在无曝气的环境里,DOM四组分的释放大小排序为:C1>C2>C4>C3,即:芳香蛋白类物质I>芳香蛋白类物质II>溶解性微生物代谢产物>富里酸物质,四种组分的大小顺序会随着时间的增加而发生变化,C3与C4的大小顺序并不固定.但是在有曝气的环境里,DOM四组分在绝大部分时间的大小顺序为:C1>C3>C2>C4,,说明上述曝气因素影响DOM四组分的分布规律.在248h之后,不同曝气梯度下DOM四组分的释放强度均急速下降,迅速降至最小值,说明该类腐殖土的释碳周期可能只有248h.



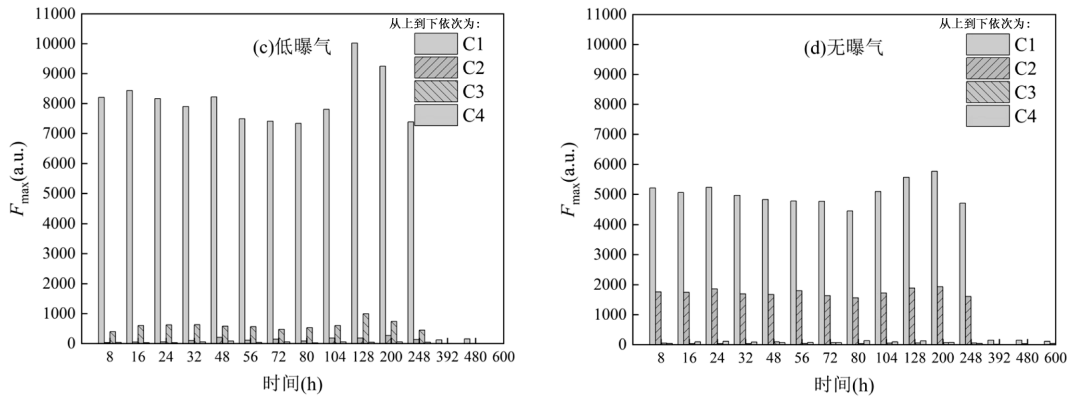


图 4 不同曝气梯度下腐殖土的三维荧光光谱—平行因子分析

Fig.4 EEM-PARAFAC Histograms of humic soil under various aeration gradients

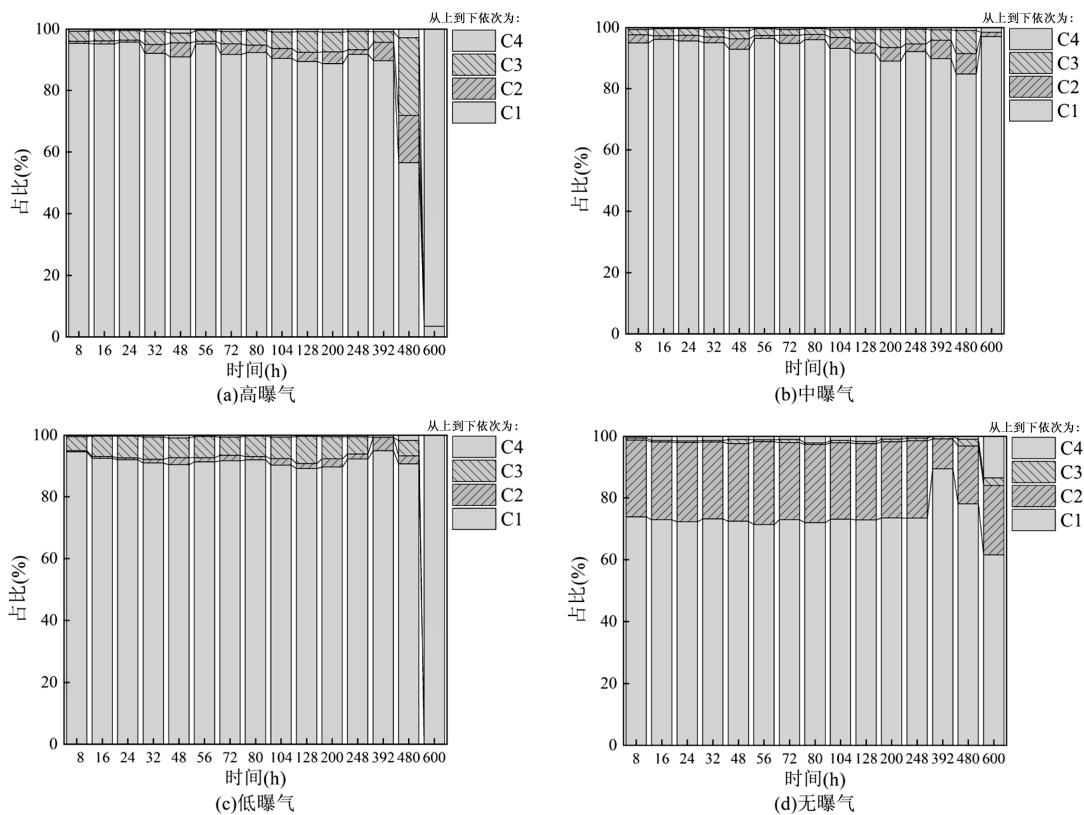


图 5 不同曝气梯度下腐殖土释碳四组分最大荧光强度

Fig.5 Histograms of the maximum fluorescence intensity of four DOM components released from humic soil under various aeration gradients

2.3 腐殖土释放 DOM 的紫外-可见吸收光谱特征

由图 6 可知,随着时间的推移,不同曝气梯度下腐殖土的 a_{254} 值在 320h 前均呈现出逐渐变大的趋势,320h 之后,高曝气下腐殖土的 a_{254} 值急速下降,其它三种梯度下腐殖土的 a_{254} 值仍然有增大的趋势.推测这是因为在氧气丰富的环境中,这些芳香族化合物被更有效地降解或转化,而在低,中,无曝气条件下,由于氧气相对较少,芳香族化合物的降解速率较

慢,因此 a_{254} 值持续增加^[33].200h 之前,腐殖土的 a_{280} 值均呈现出逐渐上升的趋势,但是 200h 之后,低曝气与高曝气环境下腐殖土的 a_{280} 值迅速下降,在 392h 之后逐渐趋向于平稳,中曝气与无曝气环境下腐殖土的 a_{280} 值始终呈现出缓慢上升的趋势.这说明中曝气与无曝气环境下腐殖土可持续释放出带有苯环结构的相关物质^[34].

如图 7 所示,无曝气与低曝气的(E2/E3-t)曲线

变化规律较为相似,均为在 16~24h E2/E3 值取得最大值,之后迅速下降,并在一个较小的区间范围里波动,在 32h 之后 E2/E3 值基本变化不大,表明释放的 DOM 逐渐转变为更高腐殖化程度的形态.这说明处在无曝气或者中曝气环境下的腐殖土可以释放出 DOM 腐殖化程度更高,适合微生物摄入利用,超过 24h 后,其释放出的 DOM 腐殖化程度迅速升高,并且在较长的一段时间内变化不大.中曝气与高曝气的 (E2/E3-t) 曲线变化规律较为相似,中曝气在 152h 之前的 E2/E3 值波动不大,在 152h 之后,其 E2/E3 值持续上升,高曝气在 248h 之前的 E2/E3 值波动不大,在 248h 之后,其 E2/E3 值迅速上升.

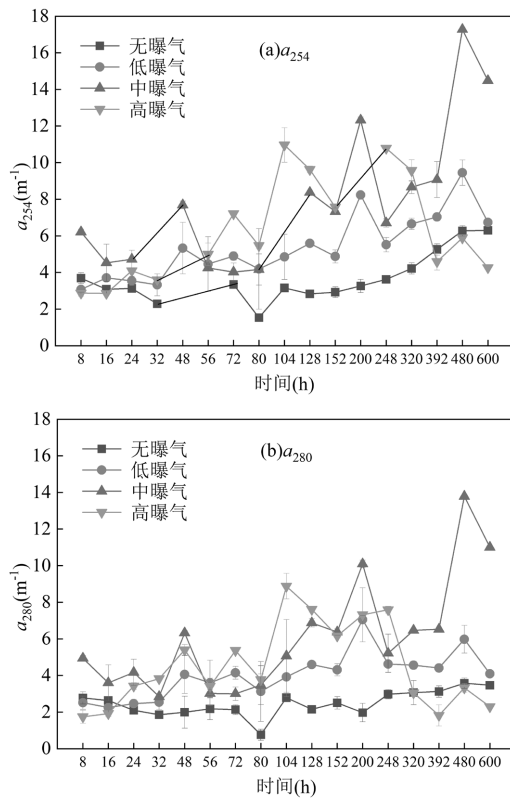


图 6 不同曝气梯度下腐殖土释碳的 a_{254} 和 a_{280} 值

Fig.6 a_{254} and a_{280} indicating carbon release from humic soil under various aeration gradients

这说明随时间变化,曝气强度会影响腐殖土释放出的 DOM 腐殖化程度.曝气强度的增加,腐殖土后期释放的 DOM 的腐殖化程度降低,更有利于微生物利用分解^[35].

如图 8 所示,随着时间的推移,不同曝气梯度下腐殖土释放出 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值呈现出逐渐上升的趋势,这说明 DOM 的芳香性逐渐变大.在 16h 之前,

不同曝气梯度下腐殖土释放出 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值从大到小为:中曝气>高曝气>低曝气>无曝气,在 16h 之后,不同曝气梯度下腐殖土释放出 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值波动较大,但在绝大部分时段里,有曝气环境的腐殖土,其释放出 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值均大于无曝气环境下的 $SUVA_{254}$ 值.

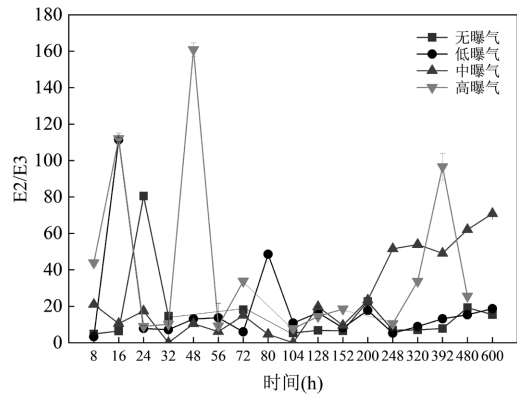


图 7 不同曝气梯度下腐殖土释碳的 E2/E3 值

Fig.7 E2/E3 indicating carbon release from humic soil under various aeration gradients

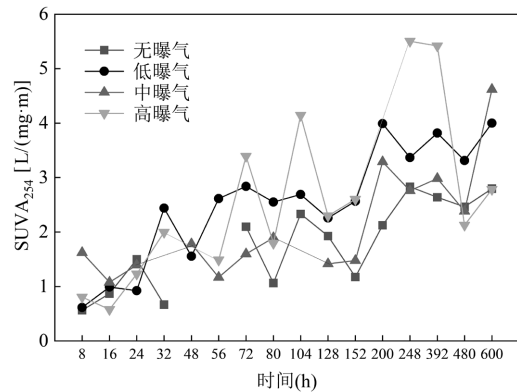


图 8 不同曝气梯度下腐殖土释碳的 $SUVA_{254}$ 值

Fig.8 $SUVA_{254}$ indicating carbon release from humic soil under various aeration gradients

3 结论

3.1 曝气因素的介入,会提高腐殖土释碳的强度.在中曝气量之前,曝气强度越大,释碳量越大;超过中曝气之后,曝气强度越大,释碳量反而越小.

3.2 在不同曝气梯度下,组分 C1 的占比均为最高(可达 95%),这说明芳香蛋白类物质 I 是腐殖土释放的主要物质.曝气因素对组分 C1 与 C3(富里酸物质)的释放起到了促进效果,但是对这两种组分的促进强度与效果存在差异,曝气因素对 C2(芳香蛋白类物

质 II)与 C4(溶解性微生物代谢产物)的释放起到了抑制效果,并且对这两种组分的抑制效果与强度同样存在差异.

3.3 曝气因素的介入会降低腐殖土所释放 DOM 的腐殖化程度,促进微生物对 DOM 的吸收利用.随着曝气量的增大,腐殖土所释放 DOM 的芳香性与相对含量也会变大,但是当曝气量达到某个强度之后,再增大曝气量,DOM 的芳香性与相对含量开始变小.

参考文献:

- [1] Piazza M V, Pinto P, Bazzoni B, et al. From plant litter to soil organic matter: A game to understand carbon dynamics [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2024,22(4):e2724.
- [2] Symanowicz B, Toczko R. Brown coal waste in agriculture and environmental protection: A review [J]. *Sustainability*, 2023,15(18):13371.
- [3] Zhang Y, Hobbie S E, Schlesinger W H, et al. Exchangeable manganese regulates carbon storage in the humus layer of the boreal forest [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(13):e2318382121.
- [4] De Barros J A, Stamford N P, Da Silva E V N, et al. Biofertilizer combined with sewage sludge increases the quality of soil cultivated with banana [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(4):6273–6283.
- [5] Jin L, Wang H Y, Wang Y L, et al. Allelopathic effect of soil under humus layer of broad-leaved tree (walnut) on chinese herbal medicine planting [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2022,31(7):7217–7223.
- [6] Zhao K, Wang J X, Peng G S, et al. Influence of composite fillers on sludge characteristics and extracellular polymeric substance composition and structure in the sequencing batch reactor [J]. *Chemical Papers*, 2022,76(7):4147–4158.
- [7] Du Z, Lu B, Li D, et al. Strengthening nitrogen removal of rural wastewater treatment in humus biochemical system under low dissolved oxygen conditions: Sludge and microbial characteristics [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024,366:121762.
- [8] Pan Y, Li P, Song K, et al. New model for evaluating greenhouse gas emissions from sludge treatment based on fossil and biogenic carbon migration [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023,425:138845.
- [9] Liu H, Guo X, Liu X, et al. Long-term effect of sludge compost amendment on the temporal pattern of nitrogen supply in its amended soil [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020,11(5):1953–1959.
- [10] Xu Y, Lu C, Fang Y, et al. Humic substances from sludge compost with biochar addition: an effective washing agent for arsenic removal from contaminated soil [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2024,235(6):1–19.
- [11] Wu M, Zhu R, Zhu H G, et al. Phosphorus removal and simultaneous sludge reduction in humus soil sequencing batch reactor treating domestic wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013,215:136–143.
- [12] Sang L, Zhang J, Wang X, et al. Effects of microbiological diversity in the anoxic-oxic-settling-anaerobic process strengthened by humic biological composite fillers [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2022,260:13–22.
- [13] 刘 彤.活性污泥系统溶解性微生物产物的形成与环境应激机制 [D]. 西安:西安理工大学, 2023.
Liu T, The formation of soluble microbial products and the environmental stress responding mechanism in an activated sludge system [D]. Xian: Xi'an University of Technology, 2023.
- [14] 尹 军,赵 可.腐殖活性污泥工艺在日本和韩国的应用 [J]. *中国给水排水*, 2007,(4):101–104.
Yin J, Zhao K. Application of humus activated sludge process in Japan and the Republic of Korea [J]. *China Water & Wastewater*, 2007,(4):101–104.
- [15] Guo J, Jia X, Gao Q. Insight into the improvement of dewatering performance of waste activated sludge and the corresponding mechanism by biochar-activated persulfate oxidation [J]. *Sci Total Environ*, 2020,744:140912.
- [16] 吴 敏,潘孝辉,朱 睿,等.腐殖土改善活性污泥沉降与脱水性能的研究 [J]. *中国给水排水*, 2009,25(9):45–48.
Wu M, Pan X H, Zhu R, et al. Study on improvement of settleability and dewatering characteristics of activated sludge by humus soil [J]. *China Water & Wastewater*, 2009,25(9):45–48.
- [17] More T, Yadav J S S, Yan S, et al. Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications [J]. *Journal of environmental management*, 2014,144:1–25.
- [18] Wong T P, Babcock Jr R W, Uekawa T, et al. Effects of waste activated sludge extracellular polymeric substances on biosorption [J]. *Water*, 2022,14(2):218.
- [19] Zhang J, Zhang Y, Lv N, et al. Electrochemistry promotion of Fe (III)/Fe (II) cycle for continuous activation of PAA for sludge disintegration: performance and mechanism [J]. *Environmental Research*, 2024:119268.
- [20] 邓云鹏.不同生育期循环曝气地下滴灌对温室番茄生长及品质影响研究 [D]. 泰安:山东农业大学, 2023.
Deng Y P. Study on the effect of circulating aeration underground drip irrigation on the growth and quality of greenhouse tomatoes at different growth [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023.
- [21] 王晓暄,李祎飞,叶 彬,等.曝气耦合表面流湿地技术净化河道水体的工艺优化及该技术对药物类污染物的去除效果 [J]. *环境工程学报*, 2022,16(2):494–505.
Wang X X, Li Y F, Ye B, et al. Aeration coupled surface flow wetland for river water treatment: Technological optimization and pharmaceutical removal performance [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022,16(2):494–505.
- [22] Tiwari J, Ramanathan A L, Baudh K, et al. Humic substances: Structure, function and benefits for agroecosystems—a review [J]. *Pedosphere*, 2023,33(2):237–249.
- [23] Wang M, Li Y, Peng H, et al. Review: Biotic and abiotic approaches to artificial humic acids production [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023,187:113771.
- [24] 韦庚锐,宋朝晖,关翔鸿,等.水体溶解性有机物的性质特征、分析手段与环境效应 [J]. *环境工程*, 2024,42(9):74–90.

- Wei G R, Song Z H, Guan X H, et al. Properties, Characterization Methods, and Environmental Impacts of Dissolved Organic Matter in Aquatic Systems [J]. *Environmental Engineering*, 2024,42(9):74-90.
- [25] 赵雄威,吴东明,李勤奋,等.基于紫外-可见光光谱法研究长期不同施肥对砖红壤溶解性有机质化学性质的影响 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2022,42(10):3210-3216.
- Zhao X W, Wu D, Li Q F, et al. Response of dissolved organic matter chemical properties to long-term different fertilization in latosol: Insight from ultraviolet-visible spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022,42(10):3210-3216.
- [26] 刘 稜,方逸川,孙孝龙.基于三维荧光光谱-平行因子分析(EEM-PARAFAC)的有机质研究进展 [J]. *净水技术*, 2022,41(10):7-16, 185.
- Liu L, Fang Y C, Sun X L. Research progress of organic matter based on three-dimensional fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis (EEM-PARAFAC) [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(10):7-16, 185.
- [27] 杨 毅,董承璇,王萍萍,等.枯水期淄河城市段底质 DOM 的空间分布、光谱特征及来源解析 [J]. *中国环境科学* [J]. 2023,43(5):2347-2353.
- Yang Y, Dong C X, Wang P P, et al. Spatial distribution, spectral characteristics and sources of sedimentary dissolved organic matter in the urban section of the Bahe River in dry season [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(5):2347-2353.
- [28] 邓汝乐,高 鹏,贾 松,等.燃烧生成棕色碳的三维荧光光谱分析 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(9):3983-3990.
- Deng R L, Gao P, Jia S, et al. Comparisons of three-dimensional fluorescence spectra of brown carbon from combustion [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(9):3983-3990.
- [29] Zhang J, Hou X, Zhang K, et al. Deciphering fluorescent and molecular fingerprint of dissolved organic matter leached from microplastics in water [J]. *Water Res.*, 2024,250:121047.
- [30] 孙剑宇.膜生物反应器城市污水处理工艺优化运行与节能降耗研究 [D]. 北京:清华大学, 2017.
- Sun J Y. Energy saving and operation optimization of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [31] 张晓亮,王洪波,杨 芳,等.山东省平度市农村黑臭水体 DOM 三维荧光光谱的平行因子分析 [J]. *环境工程技术学报*, 2022,12(3): 651-659.
- Zhang X L, Wang H B, Yang F, et al. Parallel factor analysis with three-dimensional excitation-emission matrix spectroscopy on dissolved organic matter of rural black and odorous water bodies in Pingdu City of Shandong Province [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022,12(3):651-659.
- [32] 袁乙卜,张建民,陈 希,等.大分子有机物作用下胞外聚合物对除磷污泥颗粒化的影响 [J]. *环境工程学报*, 2021,15(4):1321-1332.
- Yuan Y B, Zhang J M, Chen X, et al. Effect of extracellular polymeric substrates on the granulation of phosphorus removal sludge fed with macromolecular organic matter [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2021,15(4):1321-1332.
- [33] 鄧二铨,宋永会,段 亮,等.辽河保护区七星湿地水体溶解性有机物紫外吸收光谱研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2014,4(1):35.
- Zhi E Q, Song Y H, Duan L, et al. Study on dissolved organic matter in qixing wetland water of liaohe conservation area by using uv-visible spectroscopy [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2014, 4(1):35.
- [34] 张春洋,马永亮.UV254nm+185nm 光照降解气态甲苯的实验研究 [J]. *中国环境科学*, 2011,31(6):898-903.
- Zhang C Y, Ma Y L. Experimental study on UV_{254nm}+185nm photodegradation of gaseous toluene [J]. *China Environmental Science*, 2011,31(6):898-903.
- [35] 彭 帅,陈晓国,李晓光,等.不同填埋龄垃圾腐殖土中细菌群落结构特征 [J]. *环境工程技术学报*, 2021,11(5):879-887.
- Peng S, Chen X G, Li X G, et al. Study of bacterial community structure characteristics in humus soils of different landfill ages [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021,11(5):879-887.

作者简介: 陈毅强(1995-),男,江苏南京人,工程师,博士,主要从事水污染生物治理技术研究.发表论文 7 篇.chenyqj@hotmail.com.