

秸秆-牛粪发酵过程中溶解性有机质的荧光光谱特征

李艳^{1,2}, 魏丹^{1,2*}, 王伟³, 金梁², 丁建莉², 蔡姍姍⁴, 胡钰¹, 白杨¹

1. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030
2. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097
3. 黑龙江省农业科学院土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086
4. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866

摘要 溶解性有机质(DOM)在自然生态系统有机物向无机物的转换过程中起重要作用。DOM在发酵过程中为微生物提供营养和能量,同时对腐殖质的迁移和转化具有重要的指示作用。牛粪有助于提高玉米秸秆腐殖化效率,使农业废弃物得以更好的利用。为探讨玉米秸秆-牛粪体积比2:8(T1)、4:6(T2)、6:4(T3)和8:2(T4)处理发酵过程中DOM的特征,采用三维荧光光谱-平行因子分析法,分析发酵底物中DOM的荧光组分;通过荧光指数(FI)和自生源指数(BIX)来表征DOM的来源,用腐殖化指数(HIX)分析发酵物料的腐殖化程度,并分析DOM各组分间最大荧光强度的相关性。结果表明:4个处理过程中DOM来源受自生源和外生源的共同影响($FI > 1.4$, $0.8 < BIX < 1.0$),其中T3具有较强的自生源特性。至第40 d时,4个处理的腐殖化程度尚较弱($HIX < 1.5$),T3的腐殖化程度相对较高。发酵过程中DOM包含3种荧光组分:类富里酸[紫外类富里酸(230~275/415~455 nm)和可见类富里酸(300~360/415和455 nm)]、类胡敏酸(250~275, 340~370/455 nm)和类蛋白质[类色氨酸(225, 275/330~345 nm)和类酪氨酸(220/303 nm)]。4个处理DOM的3种荧光组分的荧光强度及相对百分比变化趋势一致:类富里酸和类胡敏酸升高,类蛋白质降低;各处理条件下总荧光强度均随发酵时间呈现先升高后降低的趋势,最后趋于稳定;最大总荧光强度出现在发酵过程的第15 d,其中T3类胡敏酸荧光强度值及相对百分比最大。随着秸秆比例升高,荧光组分的相对百分比类蛋白质>类富里酸>类胡敏酸。类富里酸和类胡敏酸之间呈现极显著正相关。基于此,根据DOM荧光光谱特性,为提高玉米秸秆在有机物料发酵中的利用率,秸秆-牛粪体积比为6:4可作为实际堆肥的参考值。

关键词 溶解性有机质;三维荧光光谱;玉米秸秆;牛粪

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)09-2846-07

引言

随着我国农作物年产量增加,秸秆处理难、利用率低已成为农业绿色、可持续发展的难点问题^[1]。同时,畜禽养殖量增加导致畜禽粪便量积累,需要通过安全的手段将农业、畜牧业产生的有机废弃物通过生物代谢作用进行转化,形成的物质富含大量的腐殖酸,可为农业生产的有机肥提供养分来源^[2]。以牛粪、秸秆为发酵原料,经过堆腐形成有机肥料在农业生产中被广泛使用^[3]。

溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)是生态系统中能量输入的活跃成分和物质循环的重要组成部分^[4],因其具有高度流动性、不稳定性,可以对物质迁移和转化产生影响^[5-7]。目前,国内外对于DOM的研究主要集中于其来源、分布、组成特征、迁移转化规律和生物毒性等方面,研究所采用技术主要为紫外-可见光谱、三维荧光光谱、核磁共振和傅里叶变换红外光谱等,并借助多元统计方法对DOM进行定量或定性分析^[5-8]。

研究有机物料发酵过程中DOM组分结构对了解发酵及腐熟度具有十分重要的意义,如Xie等^[2]利用三维荧光光谱

收稿日期:2020-07-08, 修订日期:2020-11-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0201001, 2019YFD1100304-03),北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJXC20200801, KJXC20190408),黑龙江省农业科学院科研项目(2019CGJL007),黑龙江省肥料工程技术研究中心能力提升项目(ZY18A04)资助

作者简介:李艳,1987年生,东北农业大学资源与环境学院博士研究生 e-mail: li.yan622@163.com

* 通讯作者 e-mail: wd2087@163.com

技术结合二维相关光谱和结构方程解析方法,以综合分析畜禽粪便和秸秆堆肥过程中胡敏素合成和演化机制及影响因素。Gao 等^[9]利用三维荧光光谱技术和傅里叶变换红外光谱技术对堆肥腐殖化过程研究结果表明,与秸秆相比,粪污稳定性和腐殖化程度较低,腐殖化过程具有多个相同的荧光结构,而秸秆腐殖化程度主要受含碳物质的影响。张丰松等^[10]利用三维荧光光谱技术测定猪粪、牛粪发酵后的 DOM 荧光特性结果得出,畜禽粪便堆肥发酵后 DOM 组成发生变化,含有大量的富里酸和胡敏酸,并与畜禽粪便中的重金属 Cu 发生络合作用,使络合物的迁移性和生物可利用性降低。

基于此,本研究选择玉米秸秆和牛粪进行有氧发酵,按照不同体积比例进行处理,通过三维荧光光谱技术结合平行因子分析法对发酵过程中样品 DOM 荧光特性进行分析,分

析发酵时间及不同比例对 DOM 组成和结构的影响;为进一步探讨玉米秸秆-牛粪发酵过程中 DOM 的迁移转化和变化规律提供科学依据;对生产实践中提高堆肥腐熟度和堆肥品质,选择最优物料比例和提高秸秆利用率具有十分重要的理论与实际意义。

1 实验部分

1.1 材料

玉米秸秆采自黑龙江省哈尔滨市道外区民主乡光明村,将田间玉米收获后所得的秸秆风干,粉碎至平均长度约为 3 cm;牛粪采自哈尔滨市民主乡光明村农户家,为圈养牛的新鲜粪便。玉米秸秆和牛粪基本理化性质见表 1。

表 1 玉米秸秆和牛粪的基本理化性质

Table 1 Basic physiochemical properties of corn straw and cow dung

材料	C 含量/%	N 含量/%	C/N	含水率/%	pH 值
玉米秸秆	39.98±4.32	1.32±0.11	30.28±3.92	12.89±0.95	7.06±0.03
牛粪	39.01±3.98	2.65±0.09	15.24±2.01	34.72±4.55	8.55±0.05

1.2 方法

实验地点设置在黑龙江省农业科学院晾晒场,通风条件良好。发酵过程在塑料材质的小型发酵保温箱(80 L)中进行,发酵箱密闭条件良好(发酵箱内安装有温度计,检测发酵过程中温度控制)。实验设置 4 个处理,按照玉米秸秆:牛粪,体积比分别为 2:8(T1)、4:6(T2)、6:4(T3)和 8:2(T4),每个处理重复 3 次。堆肥发酵前先将粉碎的玉米秸秆与牛粪按体积比混合均匀,用尿素将 C/N 比调整为 25:1。发酵实验期间,每隔 4 d 进行翻堆(用铁锹进行上下搅拌),并调节发酵物料含水量,使其水分含量维持在 55%~60%。所有处理同时进行,自 2019 年 5 月 7 日至 2019 年 6 月 17 日,共计 40 d。分别采集第 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 和 40 d 的样品,共采集 8 次。采样时每个处理从保温箱体(上部、中部、下部)各取 60 g,取样 3 次重复后混合均匀。去除杂质后将样品自然风干,粉碎过筛(孔径 2 mm),在常温下保存备用。

参考文献^[11]的方法,本研究取风干粉碎后样品 5 g,加入双蒸水(Milli-Q,电阻率为 18.2 MΩ·cm⁻¹),质量体积比[W(g):V(mL)]为 1:10,室温条件下水平振荡(200 r·min⁻¹) 24 h。用离心机离心 20 min(4 ℃,12 000 r·min⁻¹),上清液过孔径为 0.45 μm 的滤膜,滤液即为 DOM。利用 multi N/C 2100 型 TOC 分析仪(Aanalytik Jena AG,德国)测定样品溶液 DOM 浓度,稀释溶液 DOM 浓度调至 15 mg·L⁻¹。

利用荧光光谱测定仪(日立 F-7000 型,日本)测定溶液 DOM 荧光特性,参数设置同样参考文献^[11]的方法:PMT 电压:700 V;激发光源:450 W 氙弧灯;信噪比>110;带通:Ex 和 Em 均为 5 nm;扫描速度:1 200 nm·min⁻¹;响应时间:仪器自动校正;三维荧光光谱扫描范围:Ex 和 Em 均设置为 200~600 nm。在荧光发射光一侧添加截止滤光片

(290 nm)。

1.3 数据处理

利用荧光光谱软件[FL WinLab software (Perkin Elmer)]进行实验数据收集,Matlab R2013a 软件 Removescatter 工具包进行去散射处理,DOMFluor 工具包进行平行因子分析,运用残差分析和对半分析进行模型检验,绘制三维荧光图谱。参考文献^[6],通过 Origin 2019b 软件,计算荧光光谱指数:荧光指数(fluorescence index, FI)、生物指数(biological index, BIX)、腐殖化指数(humification index, HIX)。利用 SPSS 19.0 软件进行差异显著性检验及相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 DOM 荧光光谱指数

采用 FI, BIX 和 HIX 表征不同比例秸秆-牛粪发酵过程中 DOM 的来源特征和腐殖化程度,见表 2。FI 可反映腐殖质来源,BIX 衡量自生源有机质在所测物质中的相对百分比大小,HIX 表征有机质腐殖化程度^[6]。发酵至第 40 d 时,4 个处理 FI 介于 1.722~1.936,不同处理 FI 均大于 1.4,其中 T1 和 T2 小于 1.9,说明这两个处理中 DOM 来源受自生源和外生源共同作用的影响,既来自于秸秆-牛粪物料中自身的 DOM,亦有发酵过程中微生物分解物料新近产生。T3 和 T4 的 FI 均大于 1.9,T3 条件下表现更强的自生源特性,DOM 更多来自于微生物的分解作用。BIX 变化范围为 0.842~0.905,说明 4 个处理发酵至第 40 d 时,DOM 均呈现较强的自生源特征(0.8<BIX<1.0^[9])。HIX 变化范围为 0.603~0.982,表明各处理发酵至第 40 d 时腐殖化程度均不高(HIX<1.5^[9,12]),主要是因为秸秆腐解需要较长时间,其中 T3 中 HIX 极显著高于其他处理,即秸秆-牛粪比例为 6:4 时,腐殖化程度相对较高。

表 2 DOM 荧光光谱指数

Table 2 Fluorescence spectrum indices of DOM

处理	荧光指数 FI	自生源指数 BIX	腐殖化指数 HIX
T1	1.871±0.011	0.862±0.008	0.608±0.005D
T2	1.808±0.089	0.856±0.004	0.656±0.005C
T3	1.926±0.010	0.848±0.006	0.975±0.006A
T4	1.907±0.004	0.901±0.004	0.787±0.009B

注：表中所列数据为平均值±标准差。大写字母代表差异极显著 ($p < 0.01$)

Note: The values are mean±standard deviation. Different capital letters represent very significant difference ($p < 0.01$).

2.2 DOM 荧光组分特征

采用平行因子法分析不同处理 DOM 的三维荧光光谱数据，均得到 3 种荧光组分。参考文献[4, 8, 13-14]，4 个处理

荧光组分和荧光峰类型结果见表 3，荧光组分的三维荧光光谱分布见图 1。

表 3 不同处理的 DOM 荧光组分特征
Table 3 Characteristics of DOM fluorescence components in different treatments

DOM 荧光组分	组分类型	研究对应 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}/nm$	荧光峰
C1	紫外光区类富里酸	230/415~430	A
	可见光区类富里酸	300~325/415	C
C2	短波类色氨酸(类蛋白质)	225/330~345	T
	长波类色氨酸	275/330~345	T1
C3	类胡敏酸	250~275/455, 340~370/455	F
C4	类酪氨酸(类蛋白质)	220/303	B

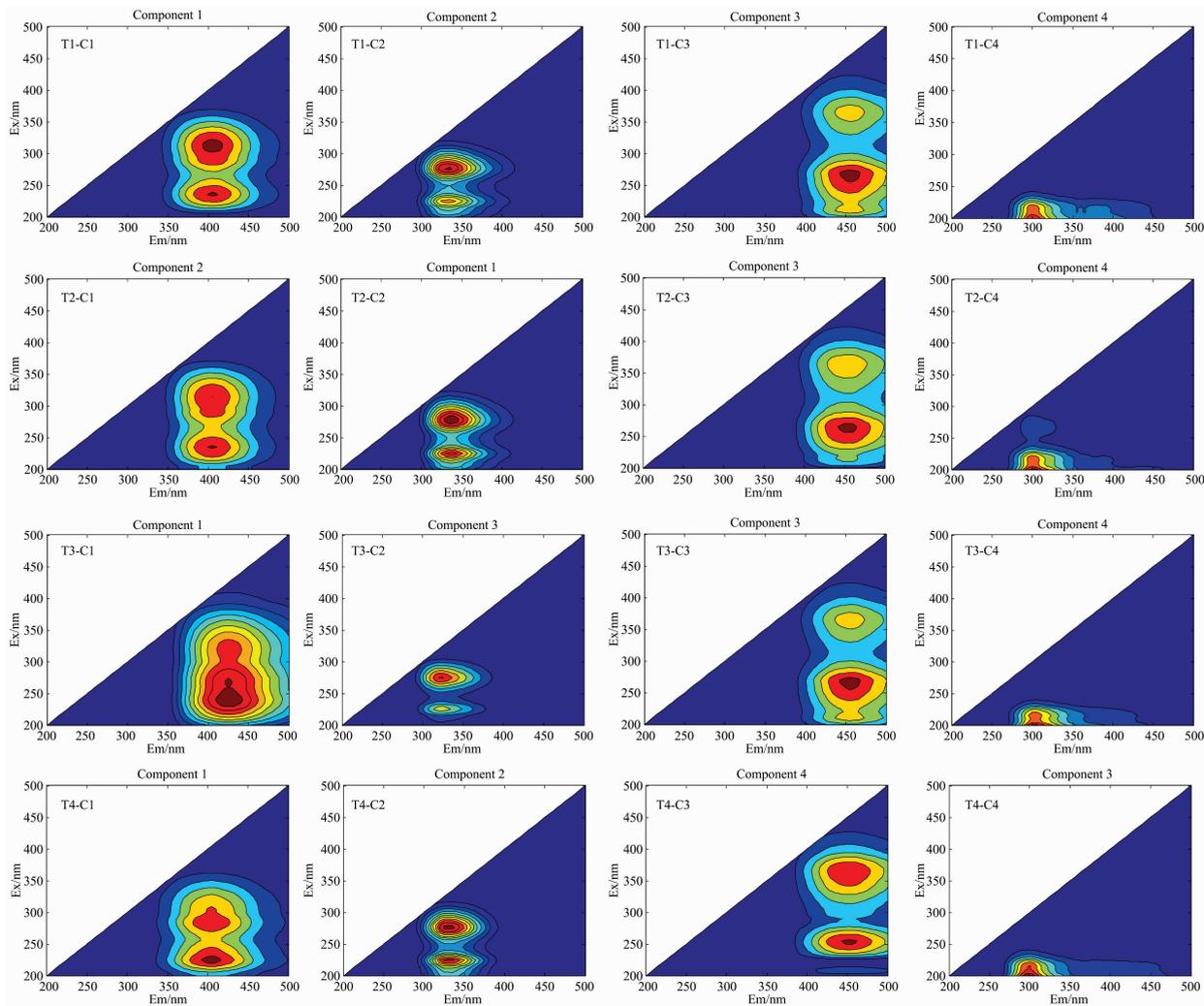


图 1 不同处理 DOM 三维荧光组分

A 峰：紫外光区类富里酸；C 峰：可见光区类富里酸；T 峰：短波类色氨酸(类蛋白质)；
T1 峰：长波类色氨酸；F 峰：类胡敏酸；B 峰：类酪氨酸(类蛋白质)

Fig. 1 Three dimensional fluorescence components of DOM in different treatments

Peak A: fulvic acid in UV region; Peak C: fulvic acid in visible region; Peak T: short wave tryptophan (proteinoid);
Peak T1: long wave tryptophan; Peak F: humic acid; Peak B: tyrosine (proteinoid)

4 个处理中 DOM 的 3 个荧光组分相同。其中组分 C1 包含 2 个激发峰和 1 个发射峰, 分别代表紫外光区类富里酸和可见光区类富里酸, 分别对应着 A 峰和 C 峰。李帅东等^[14]研究表明腐殖质化学结构中羧基和羟基与类富里酸含量有关。A 峰所代表的物质主要由相对分子质量较大、生物可降解性较低的有机物产生, C 峰所代表的物质主要源于相对分子质量较小的有机物, 这类物质一般生物可降解性较高, 具有良好的光化学性, 表现出较高的荧光效率, 易被氧化分解。这两类物质均属于类腐殖酸, 常指示外源物质的输入。

组分 C2 包含 2 个激发峰和 1 个发射峰, 均指示类色氨酸, 与羧基官能团有关, 分别对应指示短波类色氨酸的 T 峰和指示长波类色氨酸的 T1 峰。张博等^[15]研究表明在发酵过

程中类色氨酸是微生物降解的溶解性代谢产物, 易与在同一蛋白质中结合的酪氨酸发生能量转移, 对荧光峰具有复杂影响, 类色氨酸属于类蛋白质组分。

组分 C3 包含 2 个激发峰和 1 个发射峰, 代表了类胡敏酸, 属于腐殖质类物质, 对应 F 峰。类胡敏酸分子量较大, 腐殖化程度较高, Nie 等^[16]研究中类胡敏酸含有多环芳烃和苯环, 且与木质素降解有关。

组分 C4 为类酪氨酸, 代表类蛋白质, 对应 B 峰。Xu 和 Jiang^[17]研究结果表明, 类酪氨酸与 DOM 中在微生物作用下降解的蛋白质类物质结构相关, 因其分子量小所以比类色氨酸更容易被降解。C2 和 C4 同属于类蛋白质物质。

综上所述, 以秸秆-牛粪为原料发酵过程中产生的荧光

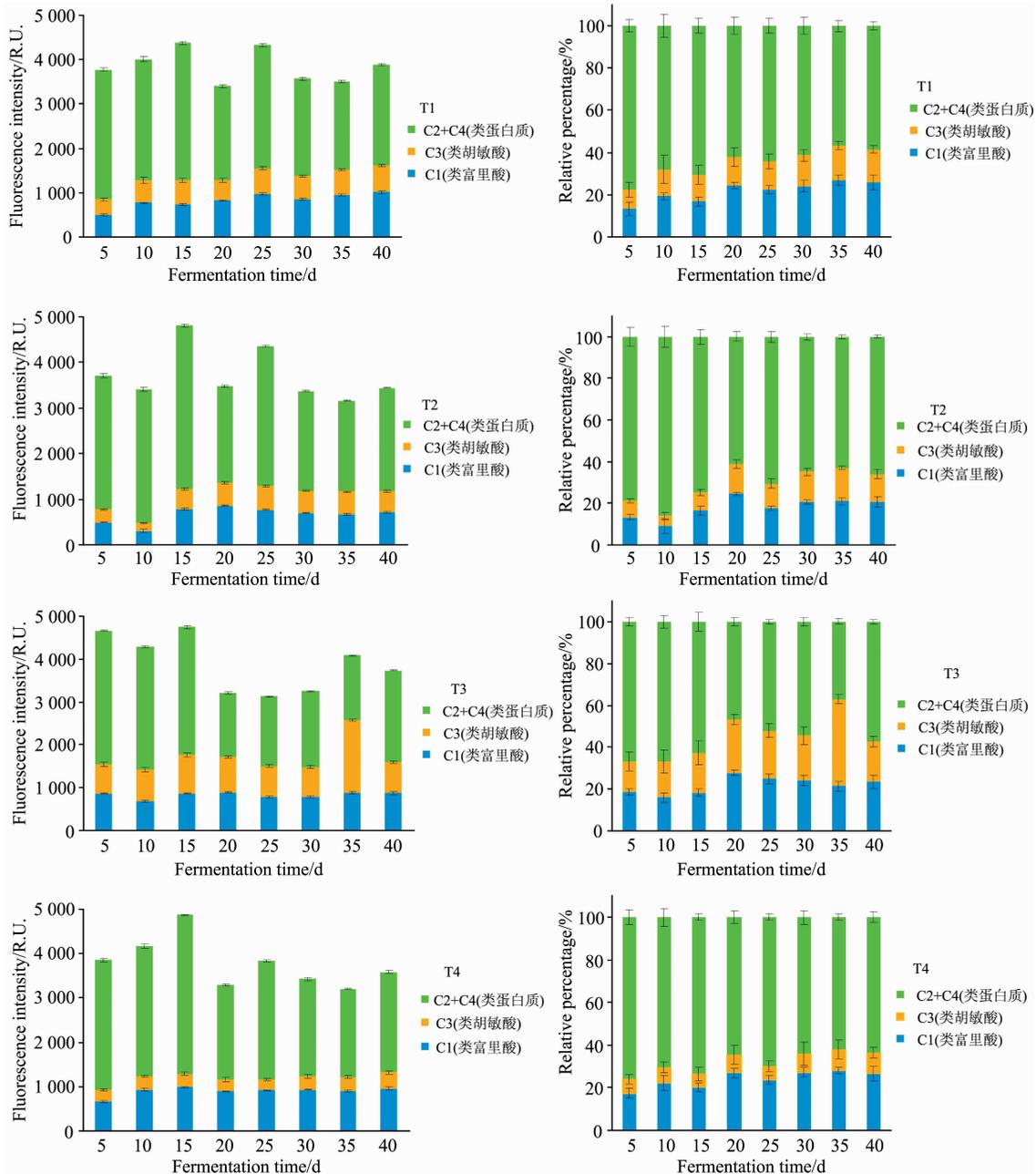


图 2 不同处理条件下的 DOM 各组荧光强度和相对百分比

Fig. 2 Fluorescence intensity and relative percentage of DOM components in different treatments

组分为：类富里酸(紫外类富里酸、可见类富里酸)、类胡敏酸和类蛋白质(类色氨酸、类酪氨酸)，与 Xu 和 Jiang^[17] 在有机物料发酵过程的荧光特性研究结果一致。

2.3 DOM 荧光组分荧光强度

为分析发酵过程中 DOM 的荧光组分随发酵时间变化规律，对 DOM 不同组分的荧光强度和相对百分比进行分析。如图 2，随发酵时间的延长，不同处理类富里酸荧光强度呈增强趋势，荧光强度 $T1 > T4 > T3 > T2$ ；类胡敏酸荧光强度呈增强趋势，荧光强度 $T3 > T1 > T2 > T4$ ；类蛋白质荧光强度呈减弱趋势，荧光强度 $T1 > T2 > T3 > T4$ 。总荧光强度 ($C1 + C2 + C3 + C4$) 随发酵时间先增加后减少，最后趋于稳定。最大总荧光强度出现在发酵第 15 d，此时 $T1 > T3 > T4 > T2$ ，其中 $T1$ 总荧光强度为 $(3\ 889.35 \pm 21.33)$ R. U.， $T3$ 总荧光强度为 $(3\ 733.59 \pm 57.30)$ R. U.。Reader 等^[5] 研究表明，荧光强度的高低与发酵产物的结构和官能团相关，类蛋白质因含有相对分子质量大的羧基、羰基等电子基团，荧光强度较低；类腐殖质因含有氨基、甲基、羟基等电子基团，荧光强度较高。因此，随着秸秆比例的升高，秸秆-牛粪腐殖化程度随发酵时间的延长而增加，随着发酵温度的升高，发酵第 15 d 物料转化速率最快，发酵物料中的脂肪、糖类、蛋白质和碳水化合物等在微生物的作用下分解生成结构简单、相对分子质量小的线形芳香环腐殖质类有机物，荧光强度较高；类色氨酸和类酪氨酸等类蛋白质荧光强度较低，其中 $T3$ 中类胡敏酸荧光强度及相对百分比最大。Gao 等^[9] 研究结果表明，荧光强度与 DOM 结构密切相关，各荧光峰荧光强度可以间接揭示 DOM 含有的活性官能团及 DOM 性质，所以本研究中第 15 d 样品可作为荧光物质转化的检测点。

3 种荧光组分的相对百分比变化趋势同荧光强度变化趋势一致，不同处理间类富里酸组分相对百分比 $T1 > T4 > T3 > T2$ ；类胡敏酸的组分相对百分比 $T3 > T1 > T2 > T4$ ；类蛋白质的组分相对百分比 $T3 > T2 > T4 > T1$ 。随着秸秆比例的升高，荧光组分相对百分比类蛋白质 $>$ 类富里酸 $>$ 类胡敏酸。D'Orazio 等^[18] 研究表明，木质素含有多糖、脂肪类成分，有利于腐殖化过程并使芳香结构成分增加，发酵后，牛粪中类蛋白质腐殖化程度和芳香性均升高，类富里酸含量显著增加。本研究与其结果完全一致，玉米秸秆中含有大量的纤维物质(木质素、纤维素)，在发酵腐殖化过程中，类蛋白质向类富里酸转化，进一步向类胡敏酸转化，类胡敏酸所占比例大小体现物料的发酵程度。发酵处理中 $T3$ 的类胡敏酸组分相对比例最高，说明该处理发酵效果最好。

2.4 DOM 荧光组分相关性分析

分析不同处理 DOM 的荧光组分相关性，见表 4，当秸秆-牛粪比例为 6:4 时，类胡敏酸荧光强度值及相对百分比最大，且类富里酸和类胡敏酸呈极显著正相关 ($p < 0.01$)，类富里酸和类胡敏酸均与类蛋白质呈负相关。荧光强度大小

及组分间的相关性反映出有机物料发酵过程中物质的转化关系及方向，为提高堆肥过程中秸秆利用率，在确定合理的发酵物料配比时，通过荧光组分的特性规律，掌握一定的配比关系，可为有机物料发酵生产有机肥提供一定的科学依据。因此，本研究秸秆-牛粪体积比为 6:4 可作为生产实践的参考。

表 4 不同荧光组分间相关性
Table 4 Correlations between different fluorescence components

处理	DOM 荧光组分	DOM 荧光组分		
		C1(类富里酸)	C3(类胡敏酸)	C2+C4(类蛋白质)
T1	C1(类富里酸)	1		
	C3(类胡敏酸)	0.879 **	1	
	C2+C4(类蛋白质)	-0.590	-0.260	1
T2	C1(类富里酸)	1		
	C3(类胡敏酸)	0.910 **	1	
	C2+C4(类蛋白质)	-0.164	-0.405	1
T3	C1(类富里酸)	1		
	C3(类胡敏酸)	0.937 **	1	
	C2+C4(类蛋白质)	-0.189	-0.364	1
T4	C1(类富里酸)	1		
	C3(类胡敏酸)	0.853 **	1	
	C2+C4(类蛋白质)	-0.030	-0.234	1

注：* * 表示极显著相关性 ($p < 0.01$)

Note: * * represent very significant correlation ($p < 0.01$).

3 结 论

(1) 秸秆-牛粪发酵过程中 DOM 来源受自生源和外生源的共同影响，因秸秆腐解时间较长，40 d 时有机质腐殖化程度尚较低；秸秆-牛粪比例为 6:4 时，自生源特性较强，且发酵末期腐殖化程度相对较高。

(2) DOM 包含 3 种荧光组分：类富里酸(紫外类富里酸和可见类富里酸)、类胡敏酸、类蛋白质(类色氨酸和类酪氨酸)。

(3) 随发酵时间，类富里酸和类胡敏酸荧光强度均增强，类蛋白质荧光强度减弱；其相对百分比和荧光强度变化趋势一致。总荧光强度随发酵时间呈现先增加后减少，最后趋于稳定的趋势，最大总荧光强度值出现在发酵第 15 d。随着秸秆比例的升高，荧光组分相对百分比：类蛋白质 $>$ 类富里酸 $>$ 类胡敏酸。类富里酸和类胡敏酸呈极显著正相关，两者均与类蛋白质呈负相关。

(4) 秸秆-牛粪体积比为 6:4 时，类胡敏酸荧光强度及相对百分比最大，可作为堆肥参考依据。

References

- [1] Ren J Q, Yu P X, Xu X H. Sustainability, 2019, 11: 1762.
- [2] Xie X Y, Pan C N, Gao X T, et al. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67: 4184.
- [3] WANG Wan, CHEN Fang-qing, HUANG Yong-wen, et al(王 弯, 陈芳清, 黄永文, 等). Biotic Resources(生物资源), 2020, 42(2): 213.
- [4] Gu N T, Song Q B, Yang X L, et al. Environmental Pollution, 2020, 258: 113807.
- [5] Reader H E, Stedmon C A, Nielsen N J, et al. Frontiers in Marine Science, 2015, 2: 88.
- [6] Li S Y, Li M, Wang G X, et al. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2019, 6(1): 20.
- [7] Cui H Y, Shi J H, Qiu L L, et al. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23: 10058.
- [8] Li W T, Chen S Y, Xu Z X, et al. Environmental Science & Technology, 2014, 48(5): 2603.
- [9] Gao X T, Tan W B, Zhao Y, et al. Environmental Science & Technology, 2019, 53: 3653.
- [10] ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, YANG Ming, et al(张丰松, 李艳霞, 杨 明, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2011, 27(1): 314.
- [11] Qin X Q, Yao B, Jin L, et al. Aquatic Geochemistry, 2020. doi.org/10.1007/s10498-019-09366-7.
- [12] Huguet A, Vacher L, Relexans S, et al. Organic Geochemistry, 2009, 40(6): 706.
- [13] He W, Hur J. Water Research, 2015, 83: 217.
- [14] LI Shuai-dong, ZHANG Ming-li, YANG Hao, et al(李帅东, 张明礼, 杨 浩, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(4): 1183.
- [15] ZHANG Bo, WANG Shu-hang, JIANG Xia, et al(张 博, 王书航, 姜 霞, 等). Journal of Lake Sciences(湖泊科学), 2018, 30(1): 102.
- [16] Nie Z Y, Wu X D, Huang H M, et al. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(9): 8756.
- [17] Xu H C, Jiang H L. Water Research, 2013, 47(17): 6506.
- [18] D'Orazio V, Traversa A, Senesi N. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 473.

Fluorescence Spectroscopy Characteristics of Dissolved Organic Matter Analysis of Straw-Cow Dung Fermentation in Different Proportion

LI Yan^{1,2}, WEI Dan^{1,2*}, WANG Wei³, JIN Liang², DING Jian-li², CAI Shan-shan⁴, HU Yu¹, BAI Yang¹

1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China

3. Institute of Soil, Fertilizer and Environmental Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China

4. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

Abstract Dissolved organic matter (DOM) plays an important role in transforming organic matter into inorganic matter in the natural ecosystem. DOM can provide nutrition and energy for microorganisms and has an important role in indicating the transfer and transformation of humus. Cow dung can improve the humification efficiency of corn straw, which makes better use of agricultural waste. In order to study the characteristics of DOM in the fermentation process of corn straw-cow dung, which were treated with 2 : 8 (T1), 4 : 6 (T2), 6 : 4 (T3) and 8 : 2 (T4), we adopted three dimensional fluorescence spectrum - parallel factor analysis method to analyze the fluorescence components of DOM in the fermentation substrate. Fluorescence index (FI) and biological index (BIX) were used to analyze the source of DOM; humification index (HIX) was used to characterize the humification degree of fermentation, and the correlation among the maximum fluorescence intensity of DOM components was analyzed. The results showed that the sources of DOM were influenced by both autochthonous and allochthonous sources ($FI > 1.4, 0.8 < BIX < 1.0$), and the T3 had strong autochthonous characteristics. On the 40th day, the humification degree of the four treatments was still weak ($HIX < 1.5$), and the humification degree of T3 was relatively high. During the fermentation, DOM contained three fluorescence components: fulvic-like acid [UV fulvic-like acid (230~275 nm/415~455 nm) and visible fulvic-like acid (300~360/415, 455 nm)], humic-like acid (250~275, 340~370/455 nm) and protein-like [tryptophan-like (225, 275/330~345 nm) and tyrosine-like (220/303 nm)]. The fluorescence intensity and relative percentage of the three

fluorescence components of DOM in the four treatments showed the same trend; fulvic-like acid and humic-like acid increased, and protein-like decreased; the total fluorescence intensity increased first and then decreased with the fermentation time, and finally tended to be stable; the maximum total fluorescence intensity appeared at the 15th day of the fermentation process, and the T3 humic-like acid has the highest fluorescence intensity and relative percentage among them. With the increase of straw proportion, the relative percentage of fluorescence components was protein-like>fulvic-like acid>humic-like acid. There was a significant positive correlation between fulvic-like acid and humic-like acid. Based on these, according to the DOM fluorescence spectroscopy characteristics, to improve the utilization rate of straw in the fermentation process, the ratio of straw and cow dung is 6 : 4, which can be used as the reference value of actual composting.

Keywords Dissolved organic matter; Three-dimensional fluorescence spectroscopy; Straw; Cow dung

(Received Jul. 8, 2020; accepted Nov. 5, 2020)

* Corresponding author

本 刊 声 明

近期以来,一些不法分子假冒《光谱学与光谱分析》期刊社名义,以虚假网站等形式欺骗广大作者、读者。这些虚假网站公然假冒《光谱学与光谱分析》期刊名义进行大肆的征稿并骗取作者的审稿费和版面费。经部分作者及读者举报,现有有关部门已就此介入调查。本刊将通过法律途径向假冒者追究相应的责任,维护本刊权利。

本刊官方网站已正式开通,网址为

<http://www.gpxygpx.com/>

在此郑重声明,本网址为《光谱学与光谱分析》期刊唯一开通运行的官方网站。本刊从未授权任何单位或个人以任何形式(包括网上网下)代理本刊征稿、审稿等项业务。

希望广大读者和作者切实维护好自身的合法权益,防止受骗上当。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2019年3月15日