

基于荧光光谱技术研究增效肥料对土壤富里酸荧光特性的影响

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

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 为探讨施用增效肥料后对土壤富里酸(FA)荧光特性及腐殖化程度的影响,在黑龙江省黑河市嫩江县和爱辉区两个试验区采取相同施肥处理,设置5个处理组:平衡施肥(NE)、平衡施肥减量25%(CK)、平衡施肥减量25%+纳米碳增效剂(T1)、平衡施肥减量25%+沸石增效剂(T2)、平衡施肥减量25%+生物炭增效剂(T3),分析土壤中FA荧光光谱特性的变化情况。三维荧光区域积分(FRI)方法不同肥料处理区域 F_{\max} 相对含量的变化表明,施用增效肥料可以提高土壤腐殖化程度,其中 $T2>T1>T3>NE>CK$,沸石增效处理对于提高土壤腐殖化程度、提高土壤的供肥水平表现最为显著,其在嫩江试验区的可见荧光FA区域V与紫外荧光FA区域III所对应的物质相对含量的比值($P_{V,n}/P_{III,n}$)较CK处理提高了5.81%,根据平行因子分析方法将土壤FA分为C1组分和C2组分,其中C2组分与C1组分 F_{\max} 的比值(C2/C1)较CK处理提高了22.09%;在爱辉试验区的 $P_{V,n}/P_{III,n}$ 较CK处理提高了4.65%,C2/C1较CK处理提高了20.93%;根据平行因子分析(PARAFAC)结果,各处理土壤FA可分为C1和C2两个组分,C1组分为类富里酸(Ex/Em=230 nm, 320/410 nm),C2组分为类胡敏酸(Ex/Em=265/465 nm),施用三种增效肥料均可以提高土壤的供肥能力,其中 $NE>T2>T1>T3>CK$ 。与CK处理相比,T1,T2和T3三个增效处理中,T2增效处理的提升作用最为明显,采用沸石作为肥料增效剂对于土壤FA的积极作用要优于纳米碳和生物炭,因此长期施用沸石增效肥料可有效提高土壤供肥能力,能够改善土壤生态环境。

关键词 增效肥料;富里酸;腐殖化;三维荧光光谱;平行因子分析

中图分类号: S143 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)05-1360-07

引言

土壤腐殖质占土壤有机质的60%~90%,土壤腐殖质是土壤有机物存在的一种特殊的形式,根据其在所有酸性和碱性溶液下溶解度的明显差异,可按其溶解度分为三个组分,在所有pH下均可溶的富里酸(FA)、在酸性条件下(通常 $pH<2$)不溶的胡敏酸(HA)和在酸碱条件下均不溶的胡敏素(HU)。衡量土壤肥力的一个重要的指标就是土壤腐殖质,土壤腐殖质对土壤理化特性有着很大的影响,例如通过增加土壤团聚体和土壤通气能力达到保水的目的,增加土壤微生物

可加快有机物的矿化并提高生物利用度,同时也能促进一些大量营养元素和微量营养元素用于植物吸收以及微生物生长,许多学者将其视为研究的热点^[1]。FA是腐殖酸和土壤溶解性有机碳库的重要组成部分,土壤FA比土壤HA具有更高生物可利用性和理化活性,在土壤中有有机物质的迁移、矿化进程中起到了重要的作用^[2]。因此,有学者开始使用各种分析方法分析FA的结构特性、物质组成^[3]。根据三维荧光光谱和平行因子分析法(PARAFAC),可以将复杂的三维荧光光谱分解为单独的荧光成分,并减弱荧光化合物之间的干扰,因此已成为定性和定量描述溶解性有机质特定荧光信息的灵敏且可靠的分析方法,从而揭示荧光光谱所存在的无

收稿日期:2020-06-04,修订日期:2020-09-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0201001,2019YFD1100304-03),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),农林复合体系模式研究与示范项目(KJXC20200601),农用生物质废弃物降解菌群快速启动及发酵参数调控项目(KJXC20190408)资助

作者简介:胡钰,1995年生,东北农业大学资源与环境学院硕士研究生 e-mail:HuYu0805@126.com

* 通讯作者 e-mail:wd2087@163.com

法识别的差异,是解析溶解性有机质和腐殖酸类物质结构、组成特性的重要资料和方法。以往研究报道对应用荧光光谱探明肥料对于土壤 FA 荧光特性和结构特征的影响的关注较少^[4]。纳米碳作为肥料增效剂可促进植物发育、改善土壤性状,而将纳米碳作为肥料包膜材料与荧光特性之间关系的研究却较少,有研究表明^[5-6],发现它可以在一定程度上可提高土壤酶和土壤微生物的活性,间接提高土壤腐殖化程度。沸石作为肥料增效剂具备许多优势,但是应用荧光光谱探究沸石材料的荧光特性的研究却很少,在土壤中施入沸石,能够在一定程度上减少有效营养元素及养分的损失^[7],提高土壤腐殖化程度^[8]。Beesley 等^[9]研究表明,向土壤中施入生物炭,可以增加土壤孔隙水中的溶解性有机碳;赵世翔^[10]和 Laird^[11]等研究表明,生物炭施入量越大,土壤有机碳含量越高。

基于此,使用荧光光谱和平行因子分析的方法,对施入纳米碳包膜肥料、沸石包膜肥料以及生物炭包膜肥料的土壤 FA 组成及其结构进行分析评价,主要的目标是三个:(1)分析增效肥料对土壤 FA 结构特性和荧光特性的影响;(2)探

究增效肥料对土壤 FA 荧光组分的影响;(3)初步阐明增效肥料对于土壤腐殖化程度的影响。这对于提升土壤腐殖化程度,拓展肥料和包膜材料的用途以及资源的可持续利用,具有重要的理论和实践意义。

1 实验部分

1.1 设置

试验于 2018 年 5 月在黑龙江省嫩江县、爱辉区进行。试验设置 5 个处理,各施肥处理、施肥内容以及施肥量详见表 1,氮肥为尿素;磷肥为磷酸二铵;钾肥为硫酸钾。纳米增效肥料是以 3% 的液体纳米碳对尿素和磷酸二铵在实验室下进行包膜处理;沸石增效肥料是以 18% 的沸石粉对尿素和磷酸二铵在实验室下进行包膜;炭基肥料是以 18% 的生物炭粉在实验室下对尿素和磷酸二铵进行包膜。指示作物为大豆(黑河 43),采用大豆垄上双行栽培技术,于 2018 年 9 月采集表层 0~20cm 的土壤样品。

表 1 施肥处理与对应肥料

Table 1 Fertilization treatment and corresponding fertilizer

施肥处理	施肥内容	施肥量
NE	平衡施肥	化肥 N 50 kg · hm ⁻² 、P ₂ O ₅ 52 kg · hm ⁻² 、K ₂ O 23 kg · hm ⁻²
CK	平衡施肥减量 25%	化肥 N 38 kg · hm ⁻² 、P ₂ O ₅ 52 kg · hm ⁻² 、K ₂ O 23 kg · hm ⁻²
T1	平衡施肥减量 25%+纳米碳增效剂	化肥 N 38 kg · hm ⁻² 、P ₂ O ₅ 52 kg · hm ⁻² 、K ₂ O 23 kg · hm ⁻² 并用 3% 的纳米碳包膜
T2	平衡施肥减量 25%+沸石增效剂	化肥 N 38 kg · hm ⁻² 、P ₂ O ₅ 52 kg · hm ⁻² 、K ₂ O 23 kg · hm ⁻² 并用 18% 的沸石包膜
T3	平衡施肥减量 25%+生物炭增效剂	化肥 N 38 kg · hm ⁻² 、P ₂ O ₅ 52 kg · hm ⁻² 、K ₂ O 23 kg · hm ⁻² 并用 18% 生物炭包膜

1.2 样品采集和实验方法

1.2.1 FA 提取与纯化^[1]

准确称取过 0.25 mm 筛土样 5.00 g,加入 30 mL 去离子水,震荡(180 r · min⁻¹, 50 °C)浸提 24 h,离心(3 500 r · min⁻¹)15 min 得上清液,用去离子水定容至 50 mL 并取 30 mL 于三角瓶中,用 6 mol · L⁻¹ HCL 调节 pH 使 pH 1.0,静置 12 h 后离心(3 500 r · min⁻¹)15 min,得上清液过滤。将滤液定容至 50 mL,过 0.45 μm 纤维树脂滤膜,即得含粗 FA 的滤液。将滤液通过树脂柱,即可以完成 FA 的纯化过程。

1.2.2 荧光光谱测定

待测 FA 样品经 TOC 分析仪(multi N/C 2100)测定其浓度,将所有 FA 样品稀释至一致浓度,采用三维荧光光谱仪(日立 F-7000)测定荧光光谱参数。主要性能参数:激发波长(Ex)扫描范围:200~490 nm,带宽 10 nm;发射波长(Em)扫描范围:250~550 nm,带宽 5 nm。PARAFAC 分析时,应消除水离子的散射,消除拉曼散射对荧光数据的影响。

1.3 数据分析

利用 MATLAB 2010 进行三维荧光图谱的绘制和 PARAFAC 分析;利用 ORIGIN 9.1 计算三维荧光区域积分、FI 指数(Em 在 470 和 520 nm 处荧光强度的比值)和 BIX 指数(Ex 在 310 nm 处,Em 在 380 与 430 nm 处荧光强度的

比值);利用 SPSS 19.0 进行相关分析。

2 结果与讨论

2.1 不同增效肥料的土壤富里酸三维荧光特性差异

根据 Chen 等^[12]提出的三维荧光区域积分(FRI)方法,计算荧光三维图谱各区域荧光响应比值(percent fluorescence response, $P_{i,n}$)。Tang 等^[13]对溶解性有机质(DOM)的三维荧光图谱进行了荧光区域积分将其分为五个荧光区域,根据三维荧光区域积分(FRI)的方法,各个区域所对应的物质相对含量可由 $P_{i,n}$ 值反映,将紫外荧光 FA 区域 III、可见荧光 FA 区域 V 所对应的物质相对含量($P_{i,n}$)记为 $P_{III,n}$, $P_{V,n}$, $P_{V,n}/P_{III,n}$ 可以用来反映土壤的腐殖程度^[14],其中 $P_{i,n}$ 越大,土壤的腐殖化程度也就越大。

表 2 嫩江不同施肥处理下土壤 FA 的荧光参数

Table 2 Fluorescence parameters of different fertilization treatments of fulvic acid in Nenjiang

	NE	CK	T1	T2	T3
$P_{III,n}/\%$	23.43	23.58	23.14	23.04	22.95
$P_{V,n}/\%$	62.93	60.99	62.31	63.12	61.78
$P_{V,n}/P_{III,n}$	2.68	2.58	2.69	2.73	2.69

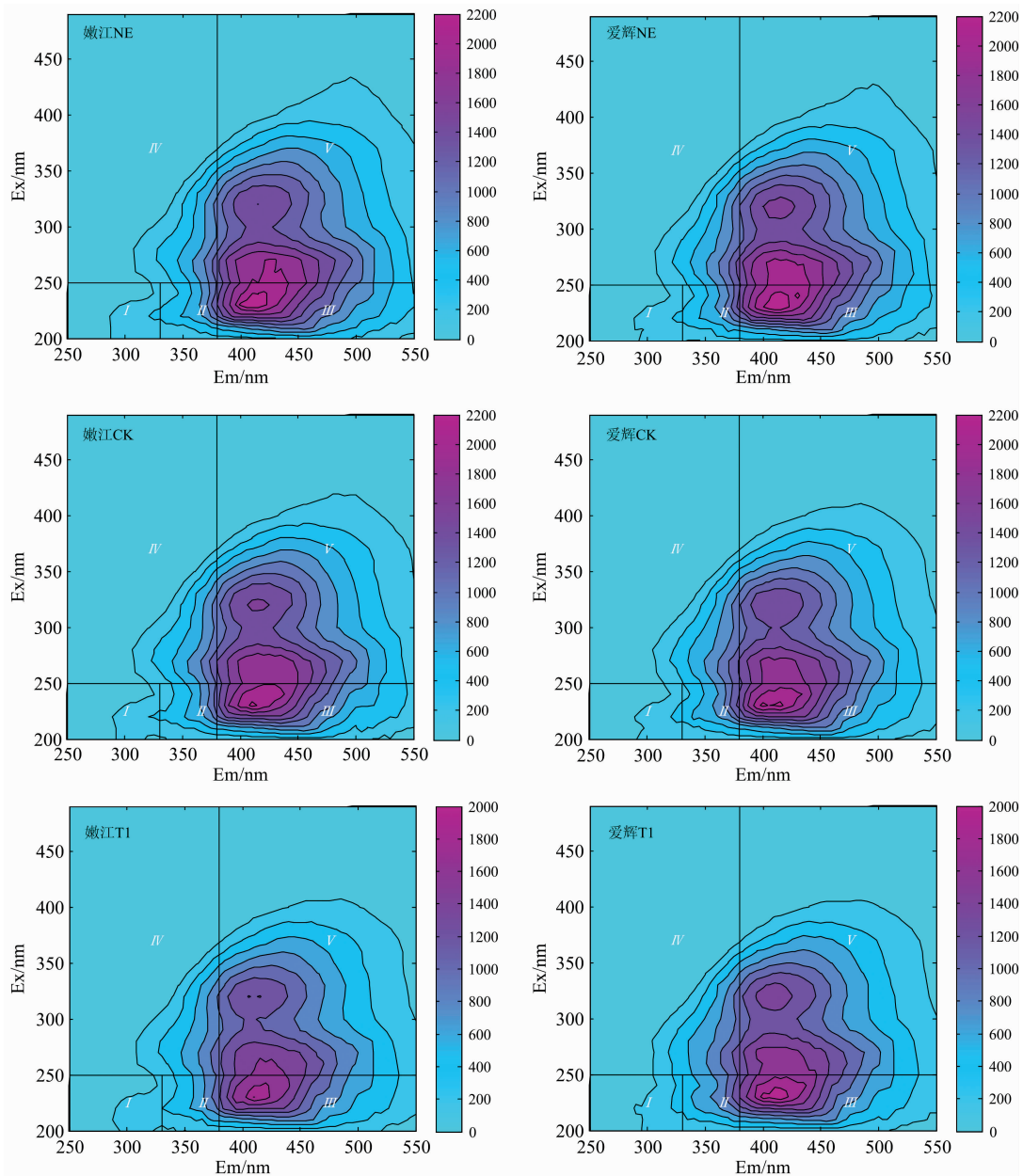
表 3 爱辉不同施肥处理下土壤 FA 的荧光参数

Table 3 Fluorescence parameters of different fertilization treatments of fulvic acid in Aihui

	NE	CK	T1	T2	T3
$P_{III,n}/\%$	23.05	23.29	23.35	22.97	23.29
$P_{V,n}/\%$	60.68	60.07	62.41	61.95	61.66
$P_{V,n}/P_{III,n}$	2.63	2.58	2.67	2.70	2.65

由表 2、表 3 可知,嫩江试验区的 T1 处理的 $P_{V,n}/P_{III,n}$ 为 2.69,比 CK 处理增加了 4.26%,较 NE 处理增加了 0.37%;爱辉试验区的 T1 处理的 $P_{V,n}/P_{III,n}$ 为 2.67,比 CK 处理增加了 3.49%,较 NE 处理增加了 1.52%,这是由于施入纳米碳增效肥料可以提高可见荧光富里酸区域的物质相对含量,从而达到提高土壤腐殖化程度的作用。嫩江试验区的 T2 处理的 $P_{V,n}/P_{III,n}$ 为 2.73,比 CK 处理增加了 5.81%,

较 NE 处理增加了 1.87%;爱辉试验区的 T2 处理的 $P_{V,n}/P_{III,n}$ 为 2.70,比 CK 处理增加了 4.65%,较 NE 处理增加了 2.66%,这是由于沸石材料属于高表面活性矿物,沸石对土壤和水体中的营养元素有较好的吸附作用,并能调节土壤颗粒结构改善理化性质,是营养元素良好的滞留场所,所以沸石包膜肥料较普通无机肥料可以有效延缓腐殖物质随雨水流失,使 FA 等腐殖物质储存在土壤中。嫩江试验区的 T3 处理的 $P_{V,n}/P_{III,n}$ 为 2.69,比 CK 处理增加了 4.26%,较 NE 处理增加了 0.37%;爱辉试验区的 T3 处理的 $P_{V,n}/P_{III,n}$ 为 2.65,比 CK 处理增加了 2.71%,较 NE 处理增加了 0.76%,这是因为生物炭疏松多孔的结构使其具有很强的吸附和持水能力,所以施加生物炭增效肥料有利于提高土壤的持水能力和有机质的积累^[11-12]。



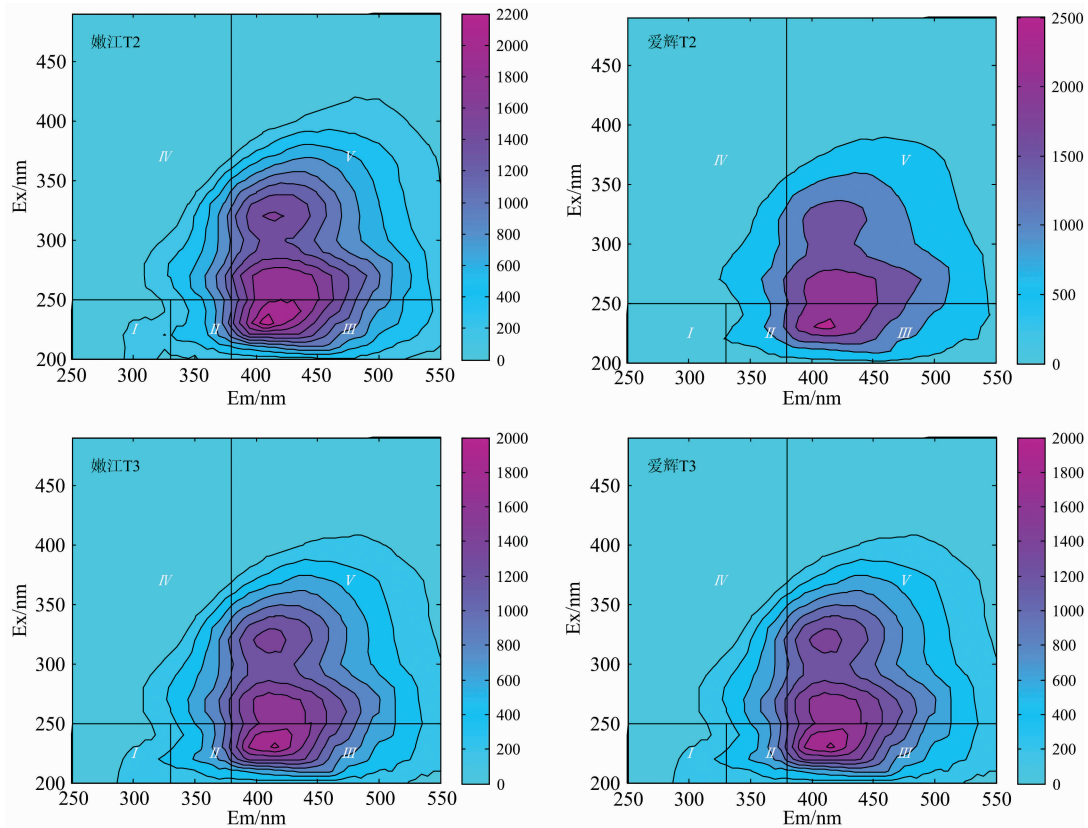


图 1 不同处理 FA 的去散射图

Fig. 1 Descattering diagram of fulvic acid treated with different fertilizers

以上数据能够说明 T1, T2 以及 T3 增效处理均可提高土壤 FA 腐殖化程度。根据 FA 传统荧光图谱分析表明, 与 CK 处理相比, 施用几种增效肥料可增加土壤 FA 的腐殖化程度, 对于提高土壤 FA 的腐殖化程度的作用表现为: T2 增效处理 > T1 增效处理 > T3 增效处理。土壤 FA 主要是通过施加肥料所产生的, 其荧光特性主要与 FA 中的结构特性有关, FA 中的苯环的数量和官能团往往会对其荧光特性有影响, 其中三种增效肥料均能够不同程度提高土壤腐殖化的程度。

有研究结果表明^[15], $r(A, C)$ 为紫外区与可见光区 FA 荧光强度的比值, $r(A, C)$ 越大, 土壤 FA 的芳构化程度越低。嫩江 NE 处理、CK 处理、T1 处理、T2 处理、T3 处理的 $r(A, C)$ 值分别是 0.372, 0.387, 0.371, 0.364, 0.371; 爱辉 NE 处理、CK 处理、T1 处理、T2 处理、T3 处理的 $r(A, C)$ 值分别为 0.380, 0.389, 0.374, 0.371, 0.378。由此可知, 不同试验地点下不同施肥处理的土壤 FA 结构复杂程度均表现为 T2 处理结构较复杂, T1 处理和 T3 处理次之, 以上 3 种增效处理的土壤 FA 结构复杂程度均大于 NE 处理, CK 处理结构最为简单。其中嫩江试验区 T2 增效处理的 $r(A, C)$ 值较 CK 处理降低了 1.89%; 爱辉试验区 T2 增效处理的 $r(A, C)$ 值较 CK 处理降低了 4.63%。施用三种增效肥料均能提高土壤 FA 组内的复杂程度, 从而延缓土壤中富里

酸的消耗, 有利于土壤肥力的保持, 因此施用增效肥料对于土壤肥力的保持作用是显而易见的。

2.2 不同新型肥料处理的平行因子分析

根据平行因子分析方法(PARAFAC), 将土壤 FA 分为 C1、C2 荧光组分, 其中 C1 组分类富里酸; C2 组分类胡敏酸。

平行因子分析方法识别出不同肥料处理的土壤 FA 均含有 2 个荧光组分。从图 2 可知, 嫩江和爱辉试验区 C1 组分中均具有 1 个最大发射峰、2 个最大激发峰, Ex/Em 的波长均为 230, 320/410 nm。嫩江和爱辉试验区 C2 组分均具有 1 个最大发射峰、1 个最大激发峰, Ex/Em 的波长均为 265/465 nm。由于 C1 组分的生物可利用性较高, 因此可作为肥力供给的重要依据, 其中 C1 组分的特征峰(Ex/Em: 230/410 nm), 与 A 峰(Ex/Em < 250/412 nm) 十分接近, 可用来表示腐殖质类物质^[16], 特征峰(Ex/Em: 320/410 nm), 位于传统 C 峰(Ex/Em: 345/433 nm)、M 峰(Ex/Em: 325/385 nm) 区域范围内, 可能与构成 FA 分子的羰基和羧基有关。各处理 C2 组分为陆生来源 FA 组分, 该组分对于改善土壤理化特性、促进团聚体形成具有显著的作用。从图 2 可知, 嫩江、爱辉试验区 C2 组分均具有 1 个最大激发峰和 1 个最大发射峰, 嫩江、爱辉试验区的 C2 组分 Ex/Em 均为 265/465 nm, 在传统 A 峰上方区域, 能够表示氨基酸类腐殖物质。

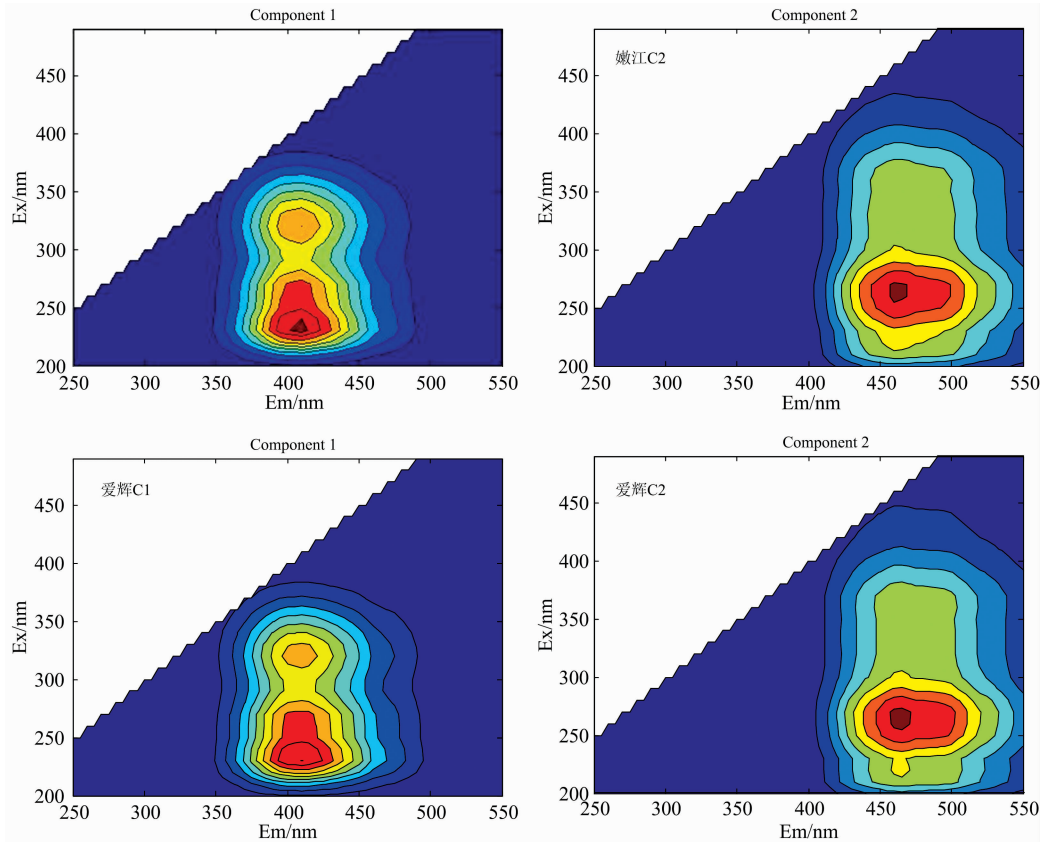
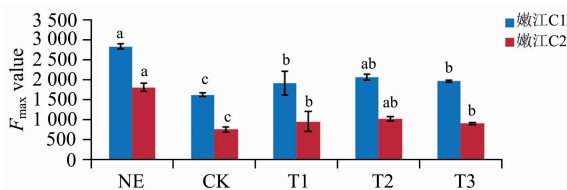
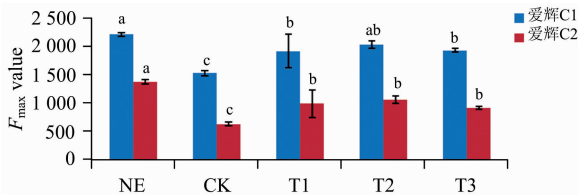


图 2 不同施肥处理的荧光组分光谱图

Fig. 2 Fluorescence component spectra of different fertilization treatments

2.3 不同肥料处理 F_{\max} 值差异分析

不同肥料处理 F_{\max} 相对含量的变化如图 3、图 4 所示, 各肥料处理间的平行因子分析方法识别出各组分相对含量说明各试验区域土壤 FA 以 C1 组分为主, C2 组分为辅。

图 3 嫩江不同施肥处理下富里酸各荧光组分对应 F_{\max} 值Fig. 3 F_{\max} values of each fluorescent component of fulvic acid treated with different fertilizers in Nenjiang图 4 爱辉不同施肥处理下富里酸各荧光组分对应 F_{\max} 值Fig. 4 F_{\max} values of each fluorescent component of fulvic acid treated with different fertilizers in Aihui

T1 增效处理、T2 增效处理、T3 增效处理的 C1、C2 组分均照 CK 处理的 C1 和 C2 组分有所增加, 嫩江与爱辉试验区 FA 的 C1 和 C2 组分 F_{\max} 值如图 3、图 4 所示。C2 组分相对含量越高, 土壤腐殖化程度就越高。嫩江试验区 NE, CK, T1, T2 以及 T3 处理的 C2 组分所占比例分别为 53.98%, 46.36%, 50.52%, 51.20% 和 47.71%; 爱辉试验区 NE, CK, T1, T2 以及 T3 处理的 C2 组分所占比例分别为 53.91%, 46.23%, 50.44%, 51.08% 和 47.58%, 由此, 嫩江试验区与爱辉试验区土壤腐殖化程度均表现为 NE 处理 > T2 处理 > T1 处理 > T3 处理 > CK 处理。其中 T2 增效处理在嫩江试验区的 $P_{V,n}/P_{III,n}$ 较 CK 处理提高了 5.81%, C2/C1 较 CK 处理提高了 22.09%; T2 增效处理在爱辉试验区的 $P_{V,n}/P_{III,n}$ 较 CK 处理提高了 4.65%, C2/C1 较 CK 处理提高了 20.93%。其中 T1 增效处理采用的是纳米碳增效剂, T1 增效处理误差偏大可能是由于所选用的液体纳米碳在实验室条件下对肥料包膜的过程中纳米碳包膜不均匀造成的。结合 FA 的平行因子分析结果可证实, 与 CK 处理相比, 施用增效肥料增加了 FA 中的生物利用组分和陆生源 FA 类物质, 表明 FA 中腐殖化水平、芳香度较高的组分对于土壤生态环境的改善有着积极的作用。

2.4 荧光组分与参数的相关性分析

通过 SPSS 对 C1 和 C2 两个组分和相关参数进行相关性分析。FI 代表荧光指数, 当 $FI < 1.4$ 时, DOM 异源特征明

显;当 FI 在 1.4~1.9 之间时,表示 DOM 是生物和非生物的混合液;当 FI>1.9 时,表明 DOM 来自于微生物代谢活动。BIX 代表 DOM 的自生源参数,反映了自生源有机物对土壤 DOM 的贡献。FI 和 BIX 均是指示 DOM 来源的指标,FI 和 BIX 越大,越有可能是自生源产生;反之,越可能是外源输入。其中,嫩江试验区的 FI 值为 1.60, BIX 值为 0.71;爱辉试验区的 FI 值为 1.57, BIX 值为 0.73。由表 4 可知, C1 和 C2 组分与 FI 和 BIX 均为负相关关系,说明土壤 FA 的两种组分有着相同的来源,平行因子分析所得到的 C1 和 C2 组分,均与陆源有机物质有关。

表 4 C1 和 C2 组分的 F_{\max} 与 FI 和 BIX 的相关性
Table 4 Correlation between F_{\max} value of C1, C2 component and FI, BIX

	嫩江		爱辉	
	C1	C2	C1	C2
C1	1		1	
C2	0.937**	1	0.867**	1
FI	-0.751*	-0.898**	-0.650*	-0.903**
BIX	-0.887**	-0.921**	-0.483	-0.768**

注: ** 在 0.01 水平上显著相关, * 在 0.05 水平上显著相关

3 结 论

(1)根据三维荧光区域积分方法以及不同肥料处理区域

References

- [1] LI Ye, ZHOU Cong-cong, DAI Ling-xing, et al(黎 烨, 周聪聪, 戴零星, 等). Acta Scientiae Circumstantiae(环境科学学报), 2017, (3): 1098.
- [2] Zhao Yue, Wei Yuquan, Zhang Yun, et al. Ecological Indicator, 2017, 72: 473.
- [3] Wei Zimin, Wang Xueqin, Zhao Xinyu, et al. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 113: 187.
- [4] Wu Junqiu, Zhao Yue, Zhao Wei, et al. Bioresource Technology, 2017, 226: 191.
- [5] ZHAO Chu, WANG Lin-jiao, SHENG Mao-yin(赵 楚, 王霖娇, 盛茂银). Environmental Science & Technology(环境科学与技术), 2019, 42(4): 71.
- [6] Rao D P, Srivastava A. Eur. Chem. Bull., 2014, 3(5): 502.
- [7] QI Na, SUN Xiang-yang, ZHANG Ting-ting, et al(祁 娜, 孙向阳, 张婷婷, 等). Guizhou Agricultural Sciences(贵州农业科学), 2011, 39(11): 133.
- [8] CAI Yan-fei, HE Cheng-xin, LIAO Zong-wen, et al(蔡燕飞, 何成新, 廖宗文, 等). Ecological and Environment(生态环境), 2003, (2): 179.
- [9] Beesley L, Moreno-Jiménez E, Gomez-Eyles J L. Environmental Pollution, 2010, 158(6): 2282.
- [10] ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, et al(赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 等). Environmental Sciences(环境科学), 2017, 38(2): 769.
- [11] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Geoderma, 2010, 158(3): 443.
- [12] Chen Wen, Westerhoff Paul, Leenheer Jerry A. Environmental Science and Technology, 2003, 37(24): 5701.
- [13] Tang Zhu, Yu Guanghui, Liu Dongyang, et al. Chemosphere, 2011, 82 (8): 1202.
- [14] Wei Z, Zhao X, Zhu C, et al. Chemosphere, 2014, 95: 261.
- [15] ZHAO Jin, XI Bei-dou, WEI Zi-min, et al(赵 瑾, 席北斗, 魏自民, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(7): 1824.
- [16] Stedmon C A, Markager S. Limnology and Ocea-nography, 2005, 50(2): 686.

F_{\max} 相对含量的变化,五个施肥处理中, T2 增效处理对于提高土壤腐殖化程度,提高土壤的供肥水平表现最为显著。根据五个处理的比较结果显示, F_{\max} 值表明, T2 增效处理有效增加 FA 中 C2 组分。

(2)不同处理条件下土壤 FA 包含两种荧光组分, C1 组分为类富里酸, C2 组分为类胡敏酸;根据差异性分析结果显示,平行因子分析所得到的 C1 和 C2 组分的 F_{\max} 值与 FI 和 BIX 呈现出负相关关系,说明土壤 FA 的来源均与陆源有机物质有关。

(3)与 CK 处理相比, T1, T2 和 T3 三个增效处理均对提高土壤供肥能力具有积极作用,其中 T2 增效处理的提升作用最为明显,采用沸石作为肥料增效剂对于土壤 FA 的积极作用要优于纳米碳和生物炭。利用增效剂对肥料表面进行包膜可以延长肥料的肥效和降低肥料的淋溶损失,沸石材料作为包膜肥料膜材料的一种,来源广泛且成本低廉,沸石材料内部孔隙较多、孔隙较大,沸石材料相较于纳米碳和生物炭有更大的比表面积,使用沸石材料包膜肥料能够为微生物提供良好的居留场所,促进微生物活动,进一步提高土壤 FA 水平,通过沸石材料包膜肥料对于增加沸石材料的应用方向以及包膜肥料膜材料的选择具有一定的指导意义,并且能够增加土壤腐殖化的程度。

Impact of Synergistic Fertilizer on the Fluorescence Characteristics of Soil Fulvic Acid Based on the Fluorescence Spectroscopy Technique

HU Yu¹, WEI Dan^{1,2*}, LI Yan¹, WANG Wei³, BAI Yang¹, JIN Liang², CAI Shan-shan⁴

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 To elucidate the effect of synergistic fertilizers amendment on the fluorescence characteristics and humification degree of fulvic acid in soil, field trials were conducted in Nenjiang county and Aihui district of Heihe city, respectively. Totally, there were five treatments: (1) balanced fertilization (NE); (2) 25% reduction in balanced fertilization (CK), (3) 25% reduction in balanced fertilization combined with nano-carbon synergist (T1), (4) 25% reduction in balanced fertilization combined with zeolite synergist (T2); (5) 25% reduction in balanced fertilization combined with biochar synergist (T3). Three-dimensional fluorescence region interal (FRI) method was used to determine the change of relative F_{\max} content among treatments. The application of synergistic fertilizers greatly improved the soil humification degree and exhibited the following pattern: T2>T1>T3>NE>CK. T2 treatment showed the highest soil humification degree and nutrient-supply capability. Especially, the ratio of relative content of the visible fluorescent FA region V and ultraviolet fluorescent FA region III ($P_{V,n}/P_{III,n}$) in T2 treatment was improved by 5.81% in Nenjiang county, and was improved by 4.65% in Aihui District as compared with CK. Soil FA was divided into C1 and C2 component using the parallel factor analysis. The F_{\max} ratio of C2 to C1 component in T2 treatment was improved by 22.09% in Nenjiang County, while was improved by 20.93% in Aihui District as compared with CK. The C2 component exhibited more complex structure and higher condensation than C1 component. The application of synergistic fertilizers improved the proportion of C2 component in FA and exhibited the following pattern: NE>T2>T1>T3>CK, indicating enhanced soil nutrient-supply capabilities by synergistic fertilizers. Overall, this study indicated that the T2 treatment significantly enhanced soil humification degree as compared with CK, and its positive effect on soil FA was superior to nano-carbon and biochar synergists. Therefore, the application of zeolite synergist would effectively improve soil nutrient-supply capability and ameliorate soil ecological conditions.

Keywords Synergistic fertilizer; Fulvic acid; Three-dimensional fluorescence spectrum; Humification; Parallel factor analysis

(Received Jun. 4, 2020; accepted Sep. 8, 2020)

* Corresponding author