

DOI: 10.11766/trxb201904200187

宋祥云, 岳鑫, 孔祥平, 柳新伟, 刘蕾, 李妍, 赵婷婷, 曾路生, 郭晓冬, 李旭霖, 刘庆花, 金圣爱, 崔德杰. 有机物料对盐土腐殖物质组成和结构特征的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 414–424.

SONG Xiangyun, YUE Xin, KONG Xiangping, LIU Xinwei, LIU Lei, LI Yan, ZHAO Tingting, ZENG Lusheng, GUO Xiaodong, LI Xulin, LIU Qinghua, JIN Shengai, CUI Dejie. Effects of Application of Organic Material on Composition and Structural Characteristics of Humic Substances in Saline Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 414–424.

有机物料对盐土腐殖物质组成和结构特征的影响*

宋祥云^{1, 2}, 岳鑫^{1, 2}, 孔祥平³, 柳新伟¹, 刘蕾⁴, 李妍¹, 赵婷婷¹, 曾路生¹, 郭晓冬¹, 李旭霖¹, 刘庆花¹, 金圣爱¹, 崔德杰^{1, 2†}

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东青岛 266109; 2. 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛市农村环境工程研究中心, 山东青岛 266109; 3. 青岛农业大学化学与药学院, 山东青岛 266109; 4. 青岛市崂山区农业农村局, 山东青岛 266061)

摘要: 通过室内培养试验研究了秸秆、秸秆堆肥、秸秆生物质炭对黄河三角洲地区盐土腐殖物质组成和结构特征的影响。结果表明, 秸秆、秸秆堆肥和秸秆生物质炭主要增加了胡敏素含量, 由对照的 $5.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分别增加至 $11.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $16.66 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20.60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秸秆堆肥和生物质炭配施胡敏酸含量增加至 $1.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 秸秆处理的富里酸由培养 30 d 时的 $3.77 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降至 $3.32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤胡敏素含量与土壤有机碳含量在培养 30 d ($R^2 = 0.84$, $P < 0.001$, $n = 10$) 和 180 d ($R^2 = 0.98$, $P < 0.001$, $n = 10$) 时均呈显著正相关关系。秸秆、秸秆堆肥、生物质炭均有利于富里酸脂族碳相对含量的增加。生物质炭有利于土壤胡敏酸芳香类物质的增加; 而秸秆或秸秆堆肥进入土壤初期, 尤其是秸秆堆肥更有利于胡敏酸中脂族和碳水化合物或多糖类物质的积累。总之, 生物质炭主要增加了胡敏素含量, 秸秆堆肥与生物质炭配施更有利于增加胡敏酸含量。秸秆在进入土壤初期增加了富里酸含量。生物质炭与秸秆或秸秆堆肥配施时, 生物质炭所占比例对胡敏素含量、胡敏酸芳香类物质含量和富里酸脂族碳含量影响较大。

关键词: 黄河三角洲; 盐土; 有机物料; 腐殖物质; 红外光谱

中图分类号: S151.9 文献标志码: A

Effects of Application of Organic Material on Composition and Structural Characteristics of Humic Substances in Saline Soil

SONG Xiangyun^{1, 2}, YUE Xin^{1, 2}, KONG Xiangping³, LIU Xinwei¹, LIU Lei⁴, LI Yan¹, ZHAO Tingting¹, ZENG Lusheng¹, GUO Xiaodong¹, LI Xulin¹, LIU Qinghua¹, JIN Shengai¹, CUI Dejie^{1, 2†}

(1. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China; 2. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao Rural Environmental Engineering Research Center, Qingdao, Shandong 266109,

* 国家自然科学基金项目(41501246)、山东省现代农业产业技术体系棉花岗位创新团队项目(SDAIT-03-06)和国家重点研发计划项目(2018YFD0800303)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41501246), the Modern Agricultural Industry and Technology System for Innovation Team of Cotton Domain in Soil and Fertilizer Post of Shandong Province in China (No. SDAIT-03-06) and the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFD0800303)

† 通讯作者: corresponding author, E-mail: cuidejie@163.com

作者简介: 宋祥云(1981—), 男, 山东淄博人, 博士, 副教授, 从事土壤有机质研究。E-mail: xsong@qau.edu.cn

收稿日期: 2019-04-20; 收到修改稿日期: 2019-10-28; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-12-06

China; 3. College of Chemistry and Pharmaceutical Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China; 4. Bureau of Agriculture and Countryside, Laoshan District, Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: 【Objective】Returning straw into soil and applying composted straw and biochar derived from straw are effective ways of increasing soil organic carbon (SOC). 【Method】Samples of saline soil were collected from the Yellow River Delta and incubated for 30 and 180 days in lab in order to study effects of application of straw, compost and biochar on composition and structural characteristics of humic substances in the soil. 【Results】Results show that the practices increased humin (Hu) more than humic acid (HA) and fulvic acid (FA). The content of Hu increased from 5.48 g·kg⁻¹ increased to 11.20 g·kg⁻¹, 16.66 g·kg⁻¹ and 20.60 g·kg⁻¹, after 180 days of incubation. In addition, the content of HA increased to 1.36 g·kg⁻¹ in the plot applied with compost plus biochar, while in the plot of straw returning, the content of FA decreased from 3.77 g·kg⁻¹ to 3.32 g·kg⁻¹, after 30 days of incubation. Positive correlations were observed between the contents of Hu and SOC in the plots incubated for either 30 ($R^2 = 0.84$, $P < 0.001$, $n = 10$) or 180 ($R^2 = 0.98$, $P < 0.001$, $n = 10$) days. Organic carbon (OC) increased mainly in Hu, especially in the plot applied with biochar. Both application of compost or returning of straw were conducive to increasing HA and FA, and application of compost plus biochar was more significant in the effect of increasing HA. The content of Hu was mainly affected by the ratio of biochar in the plots applied with biochar plus straw. Application of straw, compost or biochar was in favour of accumulation of aliphatic groups of FA, and good to accumulation of aliphatic groups and carbohydrate in HA at the initial stage in the plots applied with straw or compost, especially with compost. Application of biochar was good to increasing aromatic groups in HA, while application of straw or compost, especially the latter, was to increasing aliphatic groups and polysaccharide at the initial stage of incubation. But afterwards, aliphatic groups decreased, while polysaccharide went on increasing with the incubation lasting, regardless of treatment. 【Conclusion】In summary, biochar mainly increases the content of Hu, while compost plus biochar is in favor of increasing HA. However, straw increases the content of FA at the initial incubation stage. The ratio of biochar in the plots of applied with biochar plus straw or compost affects the content of Hu, aromatic functional groups of HA and aliphatic groups of FA.

Key words: Yellow River Delta; Salt-affected soil; Organic materials; Humic substances; Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) spectra

土壤碳固定是当前有关陆地生态系统碳循环与全球变化的地球表层过程研究的重要优先领域^[1]。秸秆还田、施用有机肥和生物质炭等均是有效增加土壤有机碳含量的方式^[2-5]。这些增加土壤有机碳含量的过程主要增加了土壤中的腐殖物质含量。通常根据溶解度可将土壤腐殖物质分为胡敏酸、富里酸和胡敏素三个组分, 占土壤有机碳含量的 60%~80%^[6-7]。秸秆深埋还田随着年限增加土壤有机碳、富里酸和胡敏素的含量呈下降趋势, 胡敏酸的含量呈上升趋势; 胡敏酸缩合度、氧化度呈上升趋势, 脂族性减弱, 芳香性增强^[8]。室内培养实验表明, 培养初期, 富里酸的形成速度大于胡敏酸; 随培养时间延长, 富里酸转化为胡敏酸或相互转化; 玉米秸秆分解最终增加了可提取腐殖质中胡敏酸的比例^[9]。玉米秸秆生物质炭施用到土壤中可增加土壤胡敏酸、富里酸和胡敏素的含量, 胡敏酸的缩合程度和芳香性降低, 氧化度增加^[5]。施用低量有机肥有利于土壤富里酸的积累, 而高量有机肥对胡敏酸和胡

敏素的积累有利^[10]。但是上述研究分别采用秸秆还田、施用有机肥或生物质炭研究土壤腐殖物质组成和结构特征变化。对于同一种类秸秆分别以秸秆、秸秆堆肥或秸秆生物质炭形式进入土壤对土壤腐殖物质组成和结构特征的影响有待进一步研究。而这将有利于增强对有机物料以不同形式在土壤中固碳稳定机制的理解。Song 等^[11]对添加棉杆、棉杆堆肥、棉杆生物质炭培养 30 d 和 180 d 的黑土有机碳含量和结构特征研究结果表明, 土壤有机碳分别有 50.84%、41.03% 和 38.55% 来源于棉杆生物质炭、棉杆堆肥和棉杆; 棉杆生物质炭主要增加了有机碳的芳基碳含量, 棉杆和棉杆堆肥更有利于酚类物质和烷基碳的含量增加^[11]。就活性有机碳变化而言, 秸秆还田对提高红壤有机质质量较有机肥慢^[12]。土壤腐殖化程度不同也会影响到土壤有机质质量。然而土壤胡敏酸、富里酸和胡敏素的含量和结构稳定性各不相同, 秸秆、堆肥和生物质炭对它们的影响有待进一步研究。

以往研究结果^[13]表明, 土壤中添加玉米秸秆培养 180 d 玉米秸秆残留量为 32.2%; 培养 360 d 玉米秸秆残留量为 30%; 培养 720 d 玉米秸秆残留量为 25.3%, 可见培养 180 d 时大部分秸秆均已经分解, 可以解释秸秆分解期间土壤腐殖物质形成规律和机理问题。通过对比培养初期 (30 d) 时土壤腐殖物质组成和结构变化, 可以探究有机物料在土壤中不同腐解阶段腐殖物质特征。本研究采用室内培养法, 采集黄河三角洲地区盐土, 添加棉秆、棉秆堆肥、棉秆生物质炭培养 30 d 和 180 d, 分析了土壤腐殖物质含量的变化。采用红外光谱法研究了胡敏酸和富里酸化学结构特征。探讨秸秆、秸秆堆肥和秸秆生物质炭对黄河三角洲地区盐土腐殖物质组成和结构稳定性的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为盐土, 于 2015 年 12 月 6 日采自山东省东营市利津县碾李村 (37° 23' 46.93" N, 118° 10' 34.83" E), 基本性质见表 1。培养前土壤腐殖物质组分含量分别为: 水溶性有机碳 0.10 g·kg⁻¹, 胡敏酸 0.92 g·kg⁻¹, 富里酸 3.64 g·kg⁻¹, 胡敏素 5.27 g·kg⁻¹。

供试有机物料为棉花秸秆、棉花秸秆堆肥、棉花秸秆生物质炭, 有机碳含量分别为 443.7 g·kg⁻¹、323.6 g·kg⁻¹ 和 576.6 g·kg⁻¹; 全氮含量分别为

10.10 g·kg⁻¹、12.81 g·kg⁻¹ 和 15.59 g·kg⁻¹。供试秸秆堆肥是棉花秸秆自然堆腐 1 a 后的堆肥物质; 生物质炭是棉花秸秆在马弗炉中 500℃ 烧制 4 h。

1.2 试验设计

室内培养实验在青岛农业大学校内进行, 共设置 10 个处理, 每个处理 3 次重复。处理如下: CK (不添加任何物料)、CS (添加棉花秸秆)、CC (添加棉花秸秆堆肥)、CB (添加棉花秸秆生物质炭)、CSB1 (棉花秸秆与棉花秸秆生物质炭按 1:2 比例添加)、CSB2 (棉花秸秆与棉花秸秆生物质炭按 1:1 比例添加)、CSB3 (棉花秸秆与棉花秸秆生物质炭按 2:1 比例添加)、CCB1 (棉花秸秆堆肥与棉花秸秆生物质炭按 1:2 比例添加)、CCB2 (棉花秸秆堆肥与棉花秸秆生物质炭按 1:1 比例添加)、CCB3 (棉花秸秆堆肥与棉花秸秆生物质炭按 2:1 比例添加)。培养前先将未添加棉秆来源碳的土壤样品含水量调节为土壤田间持水量的 60%, 在 20℃ 培养 2 周, 同时测定盐土、棉秆生物质炭、棉秆堆肥、棉秆的 C:N 比; 然后向土壤中添加棉秆生物质炭、棉秆堆肥、棉秆等, 再加 (NH₄)₂SO₄ 调节所有处理样品的 C:N 比为 20:1, 调节样品含水量为田间持水量的 60%。其中, 棉秆生物质炭添加量 (CB 处理) 为 45 t·hm⁻² (按 20 cm 土层计算), 即棉秆生物质炭添加量占土壤样品重量的 2%。其余处理按与棉秆生物质炭用量等碳量添加至土壤中^[11]。

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of tested soil

土壤类型	pH	HN/ (mg·kg ⁻¹)	Olsen P/ (mg·kg ⁻¹)	AK/ (mg·kg ⁻¹)	OC/ (g·kg ⁻¹)	TN/ (g·kg ⁻¹)	Sa/ ‰
Soil type	(H ₂ O)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	(g·kg ⁻¹)	‰
盐土 ^①	8.1	107.3	60.39	192.4	9.18	0.98	10.41

注: HN、Olsen P、AK、OC、TN、Sa 分别代表土壤碱解氮、速效钾、有机碳、全氮和盐分。下同。Note: HN, Olsen P, AK, OC, TN and Sa stands for soil hydrolyzable nitrogen, Olsen phosphorus, available potassium, organic carbon, total nitrogen and salt, respectively. ①Cryids Aridisols. The same below

1.3 分析方法

土壤碱解氮、pH、有机质等的测定采用常规分析方法^[14]。土壤盐分分析计算参考王境坤^[15]的分析方法。

土壤腐殖物质的提取采用腐殖物质组成修改法^[7]。土壤样品经去离子水提取出水溶性有机物 (Water soluble substances, WSS) 后, 用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH + 0.1 mol·L⁻¹ Na₄P₂O₇ 混合液提取出可提取腐殖物

质 (Extractable humic substances, HE)。继续用 0.5 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 将可提取腐殖物质 pH 调至 1, 分离出胡敏酸 (Humic acid, HA) 和富里酸 (Fulvic acid, FA), 剩余残渣为胡敏素 (Humin, Hu)。

腐殖物质各组分及土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 采用重铬酸钾容量法测定, 富里酸含量用可提取腐殖物质含量减去胡敏酸含量。

胡敏酸和富里酸的红外光谱采用傅里叶变换红

外光谱仪 (Nicolet iS5 型, Thermo 公司, 美国) 进行测定。测定范围 $4\ 000\sim 400\ \text{cm}^{-1}$ 。采用 KBr 压片法制备待测样品, KBr 和样品以 200 : 1 比例进行混合压片。分辨率为 $4\ \text{cm}^{-1}$, 扫描次数为 16 次。红外光谱数据采用 OMNIC 8 : 2 软件进行分析, 采用半定量分析计算各个峰面积, 用各个峰面积占总峰面积的百分比作为各吸收峰的相对强度。

1.4 统计方法

数据用 Microsoft Office Excel 2010 整理, 用 SPSS Statistic 19.0 软件 *t* 检验进行显著性差异分析。采用 Microsoft Office Excel 2010 和 Origin7.0 进行绘图。

2 结果

2.1 不同有机物料处理下水溶性有机碳和腐殖物质含量

培养 30 d 和 180 d 盐土水溶性有机碳、胡敏酸、富里酸和胡敏素的含量见表 2。培养 30 d 时, 秸秆处理和秸秆堆肥处理水溶性有机碳含量由对照的 $0.13\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分别增加至 $0.14\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.15\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秸秆生物质炭处理水溶性有机碳含量达到了 $0.12\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秸秆与生物质炭配施水溶性有机碳的含量在 $0.11\sim 0.14\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间; 秸秆堆肥与生物质炭配

表 2 培养 30 d 和 180 d 水溶性有机碳和腐殖物质含量

Table 2 Contents of water soluble organic carbon and humic substances in the soil incubated for 30 or 180 days/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments		WSS	HA	FA	Hu
30 d	CK	$0.13 \pm 0.06\text{ab}$	$1.47 \pm 0.22\text{c}$	$2.53 \pm 0.35\text{f}$	$6.48 \pm 0.56\text{h}$
	CS	$0.14 \pm 0.00\text{ab}$	$1.27 \pm 0.06\text{c}$	$3.77 \pm 0.22\text{ab}$	$9.14 \pm 0.16\text{g}$
	CC	$0.15 \pm 0.05\text{ab}$	$2.07 \pm 0.08\text{a}$	$3.55 \pm 0.14\text{bc}$	$11.84 \pm 0.36\text{f}$
	CB	$0.12 \pm 0.02\text{b}$	$1.32 \pm 0.06\text{c}$	$3.04 \pm 0.12\text{de}$	$16.66 \pm 0.41\text{a}$
	CSB1	$0.14 \pm 0.03\text{ab}$	$1.77 \pm 0.26\text{b}$	$2.87 \pm 0.19\text{ef}$	$15.13 \pm 0.76\text{cd}$
	CSB2	$0.11 \pm 0\text{b}$	$1.23 \pm 0.25\text{c}$	$3.67 \pm 0.36\text{bc}$	$15.55 \pm 0.17\text{bc}$
	CSB3	$0.12 \pm 0.02\text{b}$	$1.41 \pm 0.04\text{c}$	$3.76 \pm 0.05\text{ab}$	$13.23 \pm 0.67\text{e}$
	CCB1	$0.14 \pm 0.03\text{ab}$	$1.28 \pm 0.17\text{c}$	$3.35 \pm 0.27\text{cd}$	$16.27 \pm 0.69\text{ab}$
	CCB2	$0.18 \pm 0.02\text{a}$	$1.42 \pm 0.22\text{c}$	$3.74 \pm 0.11\text{ab}$	$16.34 \pm 0.72\text{ab}$
180 d	CK	$0.05 \pm 0.02\text{c}$	$0.95 \pm 0.12\text{c}$	$2.91 \pm 0.27\text{ef}$	$5.48 \pm 0.90\text{f}$
	CS	$0.13 \pm 0.02\text{a}$	$1.03 \pm 0.05\text{bc}$	$3.32 \pm 0.05\text{cde}$	$11.20 \pm 0.98\text{e}$
	CC	$0.12 \pm 0.03\text{a}$	$1.04 \pm 0.14\text{bc}$	$4.19 \pm 0.47\text{a}$	$16.66 \pm 0.19\text{c}$
	CB	$0.10 \pm 0.06\text{abc}$	$1.02 \pm 0.17\text{bc}$	$4.05 \pm 0.33\text{ab}$	$20.60 \pm 0.93\text{a}$
	CSB1	$0.10 \pm 0.04\text{abc}$	$0.92 \pm 0.19\text{c}$	$3.20 \pm 0.20\text{def}$	$17.12 \pm 0.31\text{c}$
	CSB2	$0.11 \pm 0.02\text{ab}$	$0.84 \pm 0.11\text{c}$	$3.67 \pm 0.18\text{bcd}$	$16.91 \pm 0.80\text{c}$
	CSB3	$0.06 \pm 0\text{bc}$	$1.24 \pm 0.12\text{ab}$	$2.99 \pm 0.27\text{ef}$	$13.18 \pm 0.51\text{d}$
	CCB1	$0.08 \pm 0.02\text{abc}$	$1.20 \pm 0.18\text{ab}$	$2.80 \pm 0.22\text{f}$	$16.58 \pm 0.36\text{c}$
	CCB2	$0.06 \pm 0.03\text{bc}$	$1.36 \pm 0.05\text{a}$	$3.20 \pm 0.39\text{def}$	$18.99 \pm 0.24\text{b}$
CCB3	$0.09 \pm 0.05\text{abc}$	$0.85 \pm 0.12\text{c}$	$3.79 \pm 0.36\text{abc}$	$19.34 \pm 0.46\text{b}$	

注: CK、CS、CC、CB、CSB1-3、CCB1-3 分别表示对照即不添加有机物料、添加棉秆、添加棉秆堆肥、添加棉秆生物质炭以及棉秆和棉秆生物质炭分别按 1 : 2、1 : 1 和 2 : 1 的比例添加, 棉秆堆肥和棉秆生物质炭分别按 1 : 2、1 : 1 和 2 : 1 的比例添加; WSS, 水溶性有机碳; HA, 胡敏酸; FA, 富里酸; Hu, 胡敏素。同一列中小写字母代表同一时间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Notes: CK, CS, CC, CB, CSB1-3, and CCB1-3 stands for CK (original soil), soil amended with cotton straw, soil amended with composted cotton straw, soil amended with cotton straw derived biochar, soil amended with cotton straw plus biochar at a ratio of 1 : 2, 1 : 1 or 2 : 1, soil amended with compost plus biochar at a ratio of 1 : 2, 1 : 1 or 2 : 1, respectively; WSS stands for water soluble organic carbon, HA for humic acid, FA for fulvic acid and Hu for humin. The lower case letters in the same column means significant difference at level $P < 0.05$. The same below

施水溶性有机碳的含量在 $0.12\sim 0.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。与培养 30 d 相比, 培养 180 d 后各处理水溶性有机碳含量降低了, 但是秸秆或秸秆堆肥处理水溶性有机碳含量仍是最高, 分别为 $0.13\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秸秆生物质炭处理水溶性有机碳含量为 $0.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秸秆与生物质炭配施水溶性有机碳的含量在 $0.06\sim 0.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间; 秸秆堆肥与生物质炭配施水溶性有机碳含量在 $0.06\sim 0.09\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。以上研究结果表明, 秸秆或秸秆堆肥较生物质炭处理土壤水溶性有机碳含量高。

培养 30 d 时, 单施秸秆、秸秆堆肥、秸秆生物质炭处理盐土胡敏酸含量分别为 1.27 、 2.07 和 $1.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而培养 180 d 时分别下降至 1.03 、 1.04 和 $1.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与培养 30 d 相比, 培养 180 d 时秸秆与生物质炭配施处理胡敏酸的含量降低了 $0.17\sim 0.86\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 秸秆堆肥与生物质炭配施处理胡敏酸的含量降低了 $0.05\sim 0.53\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。以上研究结果表明, 秸秆堆肥或秸秆堆肥与生物质炭配施土壤胡敏酸更稳定。

培养 30 d 时, 秸秆处理较秸秆堆肥处理、生物质炭处理盐土富里酸含量高, 达到了 $3.77\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秸秆和生物质炭配施处理富里酸含量随着秸秆施用比例提高而增加, 秸秆和生物质炭比例达到 2:1 时富里酸含量最高, 为 $3.76\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 秸秆堆肥和生物质炭配施处理富里酸含量也随着秸秆施用比例提高而增加, 秸秆堆肥和生物质炭比例达到 2:1 时富里酸含量同样最高, 为 $4.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

与培养 30 d 相比, 培养 180 d 时, 秸秆堆肥处理和生物质炭处理富里酸含量分别增加至 $4.19\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而秸秆处理富里酸的含量则降低至 $3.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。培养 180 d 时, 秸秆和生物质炭配施处理富里酸含量除了秸秆和生物质炭比例 1:2 处理高于培养 30 d 时相应处理, 其余两个处理富里酸含量均低于 30 d 处理, 并且随着秸秆比例提高而降低, 秸秆和生物质炭比例达到 2:1 时富里酸含量降低至 $2.99\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而秸秆堆肥和生物质炭配施处理富里酸含量随着秸秆堆肥施用比例提高而增加, 秸秆堆肥和生物质炭比例达到 2:1 时富里酸含量最高, 为 $3.79\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。以上研究结果表明, 秸秆堆肥或生物质炭有利于盐土富里酸含量的提高。

培养 30 d 时, 秸秆、秸秆堆肥、生物质炭处理盐土胡敏素含量分别为 9.14 、 11.84 和 $16.66\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

秸秆和生物质炭配施随着生物质炭比例降低胡敏素含量下降, 当秸秆和生物质炭比例为 2:1 时降至最低 ($13.23\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。秸秆堆肥和生物质炭配施也随着生物质炭用量比例降低胡敏素含量下降, 当秸秆堆肥和生物质炭比例为 2:1 时降到最低为 $14.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。但是秸秆堆肥和生物质炭配施胡敏素含量高于秸秆和生物质炭配施处理。

培养 180 d 时, 秸秆、秸秆堆肥、生物质炭处理盐土胡敏素含量分别增加至 11.20 、 16.66 和 $20.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秸秆和生物质炭配施仍然随着生物质炭用量比例降低胡敏素含量下降, 当秸秆和生物质炭比例为 2:1 时降至最低 ($13.18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。而秸秆堆肥和生物质炭配施随着秸秆堆肥比例提高胡敏素含量增加, 当秸秆堆肥和生物质炭比例为 2:1 时增加至最高 ($19.34\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。土壤胡敏素含量和土壤有机碳含量在培养 30 d ($R^2=0.84$, $P<0.001$, $n=10$) 和 180 d ($R^2=0.98$, $P<0.001$, $n=10$) 时均呈显著正相关关系 (图 1)。

以上研究结果表明, 秸秆、秸秆堆肥、生物质炭处理均可提高土壤胡敏素含量。秸秆和生物质炭配施盐土胡敏素含量受生物质炭比例影响更明显; 而秸秆堆肥和生物质炭配施培养初期土壤胡敏素含量受生物质炭所占比例影响较大, 培养后期影响减小。

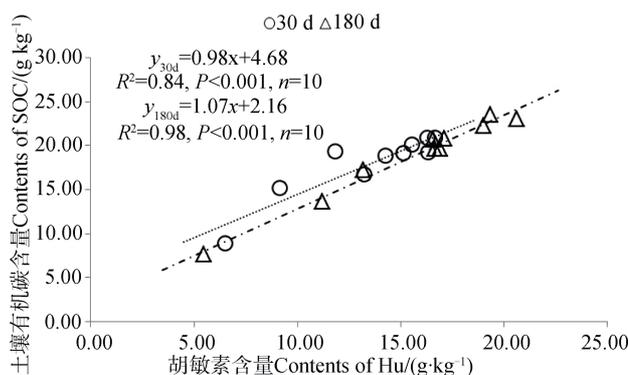


图 1 培养 30 d 和 180 d 胡敏素和土壤有机碳含量之间相关性

Fig. 1 Correlation between Hu and SOC in the soils incubated for 30 and 180 days, separately

2.2 不同有机物料处理下土壤腐殖物质红外光谱特征

本研究用胡敏酸、富里酸各个吸收峰的峰面积占总特征峰面积的百分比表示其不同吸收强度 (表

3 和表 4) [16]。土壤胡敏酸和富里酸红外光谱吸收峰归属 (图 2) 如下: $3\ 340\ \text{cm}^{-1}$ 处是羧酸、酚类、醇类等的一OH 伸缩振动; $2\ 920\ \text{cm}^{-1}$ 和 $2\ 850\ \text{cm}^{-1}$ 是脂族结构中 $-\text{CH}_2$ 和 $-\text{CH}_3$ 的 C—H 伸缩振动; $1\ 620\ \text{cm}^{-1}$ 是芳香碳化合物 C=C 伸缩振动或醌、酮和酰胺 I 带的 C=O 伸缩振动; $1\ 420\ \text{cm}^{-1}$ 是碳水化合物的 C—O 对称振动; $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 是多糖结构中 C—O 伸缩振动 [16]。根据表 3, 培养 30 d 后, 各个处理胡敏酸在 $3\ 340\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度均低于对照; 秸秆和生物质炭配施在 $3\ 340\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度随秸秆或秸秆堆肥比例增加而降低, 而秸秆堆肥和生物质炭配施则呈升高趋势。与对照相比, 各处理盐土胡敏酸在 $2\ 920\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收强度增加, 并且随着秸秆或秸秆堆肥比例加大而增大; ($2\ 920+2\ 850$) / $1\ 620$ 作为脂族碳/芳香碳比表征脂族碳和芳香碳相对变化。对照处理脂族碳/芳香碳

比为 0.01, 各处理均大于对照处理。秸秆和生物质炭配施脂族碳/芳香碳比随着秸秆比例提高而增大, 由 0.018 增加至 0.036; 秸秆堆肥和生物质炭配施脂族碳/芳香碳比也随着秸秆堆肥用量加大而增大, 由 0.036 增加至 0.044。胡敏酸各处理在 $1\ 620\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度均大于对照处理。秸秆和生物质炭配施在 $1\ 620\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度由 17.58% 增加至 18.19%; 秸秆堆肥和生物质炭配施在 $1\ 620\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度由 18.27% 增加至 18.70%。与对照相比, 各处理在 $1\ 420\ \text{cm}^{-1}$ 和 $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度也增加了, 其相对强度在秸秆堆肥处理或秸秆堆肥与生物质炭配施处理大于秸秆或秸秆与生物质炭配施处理。以上研究结果表明, 秸秆或秸秆堆肥进入土壤初期, 尤其是秸秆堆肥更有利于胡敏酸中脂肪族和碳水化合物或多糖类物质的积累。

表 3 培养 30 d 和 180 d 土壤胡敏酸红外光谱各吸收峰相对强度

Table 3 Relative intensity of absorbance peaks of HA in the soils incubated for 30 and 180 days, respectively

处理 Treatments	吸收峰相对强度 Relative intensity of absorbance peaks/%						比值 Ratio	
	$3\ 340\ \text{cm}^{-1}$	$2\ 920\ \text{cm}^{-1}$	$2\ 850\ \text{cm}^{-1}$	$1\ 620\ \text{cm}^{-1}$	$1\ 420\ \text{cm}^{-1}$	$1\ 100\ \text{cm}^{-1}$	($2\ 920+2\ 850$) / $1\ 620$	
30 d	CK	61.85	0.136	0.029	16.05	8.43	13.51	0.010
	CS	60.14	0.395	0.033	16.92	8.40	14.10	0.025
	CC	55.99	0.525	0.053	18.44	9.70	15.29	0.031
	CB	60.04	0.428	0.041	17.29	8.60	13.61	0.027
	CSB1	57.12	0.242	0.075	17.58	9.98	15.00	0.018
	CSB2	60.83	0.349	0.034	16.74	8.78	13.27	0.023
	CSB3	56.73	0.581	0.072	18.19	9.65	14.78	0.036
	CCB1	55.18	0.563	0.086	18.27	10.18	15.72	0.036
	CCB2	55.76	0.610	0.066	18.51	9.15	15.90	0.037
	CCB3	56.02	0.733	0.097	18.70	8.92	15.53	0.044
180 d	CK	59.22	0.216	0.053	16.86	9.31	14.34	0.016
	CS	57.20	0.255	0.048	16.52	7.81	18.16	0.018
	CC	54.79	0.241	0.058	18.95	8.58	17.38	0.016
	CB	59.09	0.211	0.036	16.74	9.08	14.85	0.015
	CSB1	57.57	0.153	0.041	16.25	8.19	17.79	0.012
	CSB2	58.00	0.147	0.036	15.99	8.09	17.73	0.011
	CSB3	58.49	0.135	0.030	16.70	9.23	15.42	0.010
	CCB1	60.01	0.130	0.024	17.50	9.15	13.18	0.009
	CCB2	57.28	0.134	0.033	16.45	8.11	17.99	0.010
	CCB3	58.66	0.147	0.026	16.66	8.97	15.53	0.010

表 4 培养 30 d 和 180 d 土壤富里酸红外光谱各吸收峰相对强度

Table 4 Relative intensity of absorbance peaks of FA in the soils incubated for 30 and 180 days, respectively

处理 Treatments	吸收峰相对强度 Relative intensity of absorbance peaks/%						比值 Ratio (2 920+2 850) / 1 620	
	3 340 cm ⁻¹	2 920 cm ⁻¹	2 850 cm ⁻¹	1 620 cm ⁻¹	1 420 cm ⁻¹	1 100 cm ⁻¹		
30 d	CK	56.32	0.105	0.023	17.10	10.05	16.39	0.007
	CS	59.71	0.099	0.019	16.79	9.25	14.13	0.007
	CC	54.45	0.147	0.016	17.77	10.98	16.64	0.009
	CB	55.59	0.156	0.024	17.51	10.11	16.61	0.010
	CSB1	57.47	0.867	0.141	17.01	7.83	16.68	0.059
	CSB2	56.48	0.213	0.049	17.56	8.47	17.22	0.015
	CSB3	56.62	0.183	0.027	17.26	8.46	17.45	0.012
	CCB1	57.29	0.152	0.013	17.23	9.86	15.45	0.010
	CCB2	57.23	0.150	0.020	16.82	9.11	16.67	0.010
	CCB3	55.06	0.181	0.025	17.43	9.31	18.00	0.012
180 d	CK	55.07	0.131	0.020	17.34	9.10	18.34	0.009
	CS	57.22	0.217	0.041	17.46	9.72	15.34	0.015
	CC	56.99	0.193	0.054	16.63	8.26	17.87	0.015
	CB	54.74	0.148	0.030	17.28	6.83	20.97	0.010
	CSB1	64.44	0.153	0.030	15.58	6.93	12.87	0.012
	CSB2	57.30	0.232	0.066	16.76	9.22	16.42	0.018
	CSB3	58.62	0.147	0.023	17.00	8.61	15.60	0.010
	CCB1	56.61	0.250	0.076	17.16	9.72	16.19	0.019
	CCB2	60.46	0.154	0.033	16.19	8.97	14.20	0.012
	CCB3	56.76	0.146	0.025	16.67	9.60	16.81	0.010

培养 180 d 后, 各个处理胡敏酸在 3 340 cm⁻¹ 处吸收峰相对强度均低于对照; 秸秆和生物质炭配施在 3 340 cm⁻¹ 处吸收峰相对强度随秸秆比例增加而提高, 而秸秆堆肥和生物质炭处理在 3 340 cm⁻¹ 处吸收峰相对强度随着秸秆堆肥比例提高而降低。秸秆和秸秆堆肥处理胡敏酸在 2 920 cm⁻¹ 处吸收峰相对强度分别为 0.26% 和 0.24%, 仍高于对照处理; 但是生物质炭、秸秆和生物质炭配施、秸秆堆肥和生物质炭配施在 2 920 cm⁻¹ 处的吸收峰相对强度或脂族碳/芳香碳比均低于对照处理。对照处理在 1 620 cm⁻¹ 处吸收峰相对强度为 16.86%, 秸秆堆肥处理吸收峰相对强度为 18.95%, 秸秆处理、生物质炭处理吸收峰相对强度均低于对照。秸秆和生物质炭配施处理在 1 620 cm⁻¹ 处吸收峰相对强度低于对

照, 但是随着秸秆比例增大而提高, 由 16.25% 提高至 16.70%; 秸秆堆肥和生物质炭配施在 1 620 cm⁻¹ 处吸收峰相对强度以秸秆堆肥和生物质炭比例为 2 : 1 时高于对照处理, 为 17.50%, 其余处理则低于对照处理。对照在 1 420 cm⁻¹ 处吸收峰相对强度为 9.31%, 其余处理均低于对照处理; 与对照相比, 胡敏酸在 1 100 cm⁻¹ 处各处理吸收峰相对强度增加了。以上研究结果表明, 秸秆、秸秆堆肥或生物质炭使土壤胡敏酸中脂族结构随着培养时间增加而减少, 多糖类物质仍然增加。施用生物质炭有利于土壤胡敏酸芳香类物质的增加。

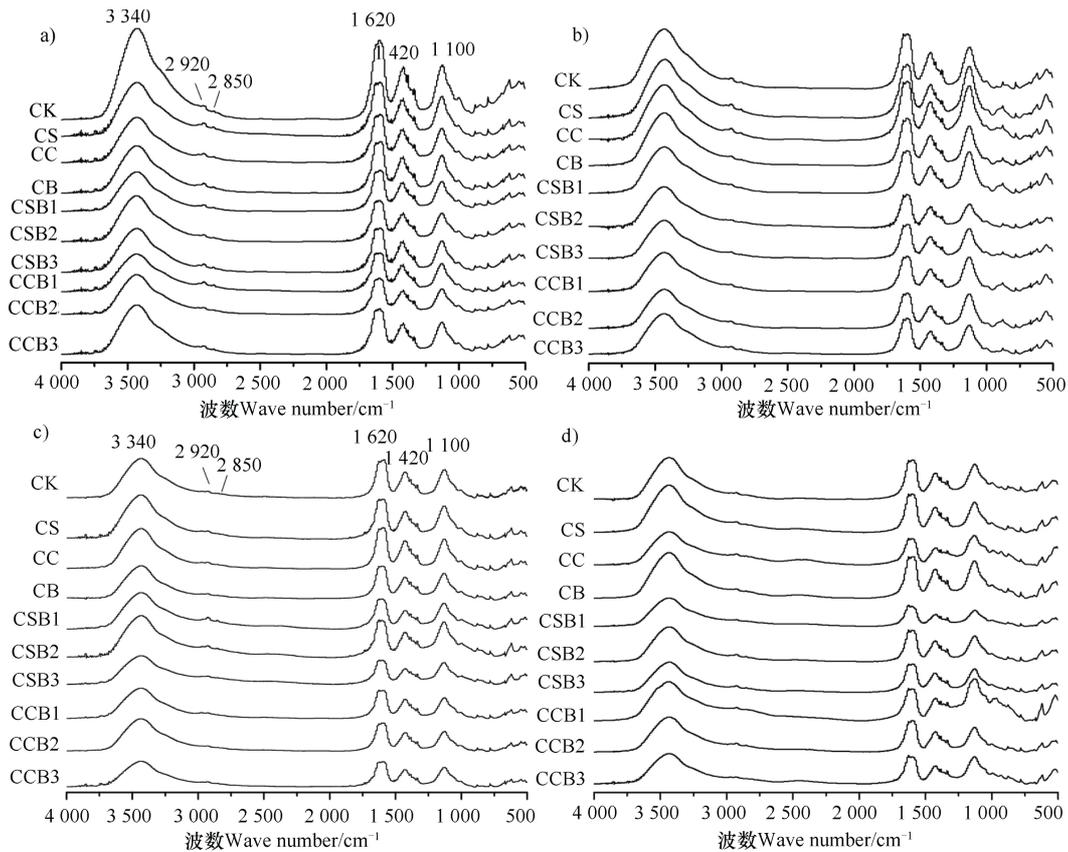
根据表 4, 培养 30 d 时, 秸秆处理富里酸在 3 340 cm⁻¹ 处吸收峰相对强度高于对照; 秸秆和生物质炭配施、秸秆堆肥和生物质炭配施在 3 340 cm⁻¹

处吸收峰相对强度随秸秆或秸秆堆肥比例增加而降低。对照处理、秸秆堆肥处理、生物质炭处理在 $2\,920\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度分别为 0.105%、0.147% 和 0.156%；脂族碳/芳香碳比分别为 0.007、0.009 和 0.01。秸秆和生物质炭配施处理在 $2\,920\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度随着生物质炭比例降低而下降，分别由 0.343% 下降至 0.183%，以及由 0.142% 下降至 0.027%；脂族碳/芳香碳比则由 0.028 下降至 0.012。秸秆堆肥和生物质炭配施处理在 $2\,920\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度随着秸秆堆肥比例增大而增加，分别由 0.152% 增加至 0.181%，以及由 0.013% 增加至 0.025%；脂族碳/芳香碳比则由 0.010 增加至 0.012。

培养 180 d 时，秸秆处理、秸秆堆肥处理胡敏酸在 $3\,340\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度高于对照；秸秆和生物质炭配施在 $3\,340\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度随秸秆或秸秆堆肥比例增加而降低。与对照相比，各

个处理在 $2\,920\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度以及脂族碳/芳香碳比均大于对照；秸秆和生物质炭配施处理在 $2\,920\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度以及脂族碳/芳香碳比随着生物质炭比例降低而略有减少，分别由 0.153 减少至 0.147、由 0.030 减少至 0.023 以及由 0.012 减少至 0.010。秸秆堆肥和生物质炭配施处理在 $2\,920\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,850\text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度以及脂族碳/芳香碳比随着生物质炭比例降低而减少，分别由 0.250 减少至 0.146、由 0.076 减少至 0.025 以及由 0.019 减少至 0.010。

以上研究结果表明，培养初期，秸秆堆肥和生物质炭有利于土壤富里酸脂族碳的增加。秸秆和生物质炭配施过程中生物质炭对富里酸脂族碳相对含量影响大于秸秆。培养后期，秸秆、秸秆堆肥、生物质炭、生物质炭与秸秆或秸秆堆肥配施均有利于富里酸脂族碳相对含量的增加，生物质炭对其影响更大。



注：图 2a) 和图 2b) 分别是培养 30 d 和 180 d 胡敏酸红外光谱，图 2c) 和图 2d) 分别是培养 30 d 和 180 d 富里酸红外光谱。
Note: The figure a) and b) is the FTIR spectrum of HA in the soil incubated for 30 and 180 days, respectively. The figure c) and d) is the FTIR spectrum of FA in the soils incubated for 30 and 180 days, respectively.

图 2 培养 30 d 和 180 d 土壤胡敏酸和富里酸的红外光谱

Fig. 2 Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) spectra of HA and FA in the soils incubated for 30 and 180 days, separately

3 讨论

3.1 有机物料对土壤腐殖物质组成的影响

生物质炭有丰富的孔隙结构,具有稳定性,可以改善土壤物理性质,提高土壤酶活性和微生物多样性^[17-20]。土壤中施用有机物料的性质、来源、施用量不同不仅可以增加土壤有机碳的含量,同时也影响了土壤中原有腐殖物质组成和结构^[4, 21-22]。土壤中原有的有机碳分别有 38.55%、41.03%和 50.84%被秸秆碳、秸秆堆肥碳和秸秆生物质炭有机碳替代^[11]。玉米秸秆配施化肥能够显著提高土壤总有机碳和轻组有机碳含量,而猪粪配施化肥则更有助于土壤微生物量碳和水溶性有机碳的积累^[22]。赵亮^[23]采用室内培养实验研究了不同有机物料对土壤腐殖物质组成的影响,结果表明棉花、麦草秸秆、木屑形成腐殖物质含量依次增高。低量有机肥有利于土壤富里酸的积累,高量有机肥有助于胡敏酸和胡敏素的积累^[10]。秸秆或有机肥本身腐解形成土壤腐殖物质尤其是胡敏酸有利于土壤腐殖化度的提高。生物质炭可提高土壤有机碳的含量。张葛等^[5]研究表明,施用生物质炭更有助于表层有机碳和腐殖物质的积累。生物质炭也可以影响土壤腐殖物质的水平^[24]。Jindo 等^[25]研究表明,施用生物质炭可以提高 10% 的土壤腐殖物质含量。本研究中秸秆、秸秆堆肥和秸秆生物质炭均主要增加了土壤胡敏素含量,但是施用生物质炭胡敏素增加量大于施用秸秆或秸秆堆肥(表 2)。这可能与生物质炭不易被微生物分解,主要残留于胡敏素中有关。胡敏素是经稀碱液提取出胡敏酸、富里酸后的剩余物质,生物质炭未被提取出即残留在胡敏素中,形成了胡敏素的一部分。胡敏素在土壤腐殖物质中所占比例可能较我们以往的认识更多^[26]。本研究中秸秆或秸秆堆肥处理土壤胡敏酸含量均增加(表 2)。秸秆或秸秆堆肥本身更有利于土壤中腐殖化度的提高。李翠兰等^[9]研究表明,玉米秸秆分解最终增加了可提取腐殖质中胡敏酸的比例。这也证明了秸秆在土壤中腐解最终提高了土壤腐殖化度。本研究中培养实验所采用的土壤采集自 0~20 cm 土层。有研究表明,玉米秸秆进入土壤亚表层(20~40 cm),也增加了土壤胡敏酸、富里酸和胡敏素的含量,改善了腐殖物质的组成^[2]。相对而言,秸秆堆肥或秸秆堆肥与生物质炭配施更有利于增加土

壤胡敏酸含量。本研究中秸秆堆肥或生物质炭也有利于盐土富里酸含量的提高(表 2)。生物质炭有可能由于激发效应促使原有土壤腐殖物质向富里酸转化。同时,生物质炭也可以被氧化^[27]。因此,推测有可能生物质炭本身被氧化分解形成了一部分富里酸。

3.2 有机物料对土壤腐殖物质结构特征的影响

通常腐殖物质被认为具有异质性,气候、土壤类型、植被类型等对腐殖物质的形成均有影响。但是腐殖物质还具有脂族性特征^[21],植物残体在土壤中的腐解过程调控着土壤有机质(碳)的化学组成和空间分布^[28]。此外,进入土壤的有机物质形态是否对腐殖物质结构特征产生影响关系到腐殖物质的稳定性。不同类型土壤以及不同有机物料来源的腐殖物质在氧化度和羧基含量上有差异^[29]。本研究中秸秆、秸秆堆肥和秸秆生物质炭均来源于秸秆,但是分别以秸秆、堆肥、生物质炭这三种形态进入土壤后的红外光谱研究表明,三者对土壤胡敏酸和富里酸化学结构影响不同(图 2)。培养初期,秸秆或秸秆堆肥,尤其是秸秆堆肥更有利于胡敏酸中脂肪族、碳水化合物、多糖类物质的积累。秸秆堆肥和生物质炭有利于土壤富里酸脂族碳的增加。秸秆和生物质炭配施过程中生物质炭对富里酸脂族碳相对含量影响大于秸秆处理。秸秆、秸秆堆肥或生物质炭使土壤胡敏酸中脂族碳相对含量随着培养时间增加而减少,而多糖类物质仍然增加。施用生物质炭有利于土壤胡敏酸芳香类物质的增加。培养后期,秸秆处理、秸秆堆肥处理、生物质炭处理或配施均有利于富里酸脂族碳相对含量的增加,生物质炭对其影响更大(表 3 和表 4)。相对而言,施用生物质炭胡敏酸结构更为复杂^[30]。本研究也表明施用生物质炭胡敏酸芳香族物质相对含量增加(表 3)。以往的研究^[11]表明,施用生物质炭可增加土壤有机碳的芳基碳相对含量,而秸秆堆肥处理可增加土壤有机碳的烷基碳和酚类物质相对含量。长期施用堆肥土壤腐殖物质烷基碳含量增加^[31]。通过长期施用猪粪也表明,胡敏酸烷基碳相对含量增加^[32]。相对生物质炭而言,堆肥更有利于胡敏酸脂族碳含量的增加。

4 结论

秸秆、秸秆堆肥和秸秆生物质炭均主要增加了

土壤胡敏素含量, 生物质炭效果更明显。土壤胡敏素和有机碳含量呈显著正相关关系。秸秆堆肥或生物质炭有利于盐土胡敏酸和富里酸含量的提高, 同时二者配施更有利于增加土壤胡敏酸含量。秸秆、秸秆堆肥、生物质炭均有利于富里酸脂族碳相对含量的增加。相对而言, 堆肥更有利于胡敏酸脂族碳含量的增加, 生物质炭更有利于胡敏酸芳香族碳含量的增加。

参考文献 (References)

- [1] Pan G X, Zhou P, Li L Q, et al. Core issues and research progresses of soil science of C sequestration. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (2): 327—337. [潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展. *土壤学报*, 2007, 44 (2): 327—337.]
- [2] Dou S. Improving subsoil fertility through a new technology of continuous in belt and deep incorporation of corn stover. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (6): 1670—1675. [窦森. 玉米秸秆“富集深还”与土壤亚表层培肥. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (6): 1670—1675.]
- [3] Wang Q Y, Yang Y Z, Xu M G, et al. Effects of long-term straw returning on stability of mineral-complexed organic matter in Shajiang black soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (5): 1108—1117. [王擎运, 杨远照, 徐明岗, 等. 长期秸秆还田对砂姜黑土矿质复合态有机质稳定性的影响. *土壤学报*, 2019, 56 (5): 1108—1117.]
- [4] Wu H Y, Li M D, Liu Q F, et al. Effects of different modes of straw returning on soil structure and character of soil organic matter. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (4): 836—841. [吴海勇, 李明德, 刘琼峰, 等. 稻草不同途径还田对土壤结构及有机质特征的影响. *土壤通报*, 2012, 43 (4): 836—841.]
- [5] Zhang G, Dou S, Xie Z B, et al. Effect of biochar application on composition of soil humus and structural characteristics of humic acid. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36 (2): 614—620. [张葛, 窦森, 谢祖彬, 等. 施用生物质炭对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征影响. *环境科学学报*, 2016, 36 (2): 614—620.]
- [6] Weil R, Brady C. *The nature and properties of soils*. Columbus: Pearson, 2016: 548—549.
- [7] Dou S, Yu S Q, Zhang J J. Effects of carbon dioxide concentration on humus formation in corn stalk decomposition. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (3): 458—466. [窦森, 于水强, 张晋京. 不同 CO₂ 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响. *土壤学报*, 2007, 44 (3): 458—466.]
- [8] Dong S S, Dou S, Shao M J, et al. Effect of corn stover deep incorporation with different years on composition of soil humus and structural characteristics of humic acid in black soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1): 150—159. [董珊珊, 窦森, 邵满娇, 等. 秸秆深还不同年限对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响. *土壤学报*, 2017, 54 (1): 150—159.]
- [9] Li C L, Zhang J J, Dou S, et al. Dynamic change in amounts of soil humic acid and fulvic acid during corn stalk decomposition. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2009, 31 (6): 729—732. [李翠兰, 张晋京, 窦森, 等. 玉米秸秆分解期间土壤腐殖质数量动态变化的研究. *吉林农业大学学报*, 2009, 31 (6): 729—732.]
- [10] Liang Y, Han X Z, Ding X L, et al. Distribution of soil organic carbon and nitrogen in density fractions on black soil as affected by different amounts of organic manure application. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (1): 174—178. [梁尧, 韩晓增, 丁雪丽, 等. 不同有机肥输入量对黑土密度分组中碳、氮分配的影响. *水土保持学报*, 2012, 26 (1): 174—178.]
- [11] Song X, Li Y, Yue X, et al. Effect of cotton straw-derived materials on native soil organic carbon. *Science of the Total Environment*, 2019, 663: 38—44.
- [12] Xu M G, Yu R, Wang B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 (5): 723—729. [徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化. *土壤学报*, 2006, 43 (5): 723—729.]
- [13] Zhang J J, Dou S, Cao Y C. Study on decomposition and transformation of soil organic matter during incubation experiment. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (5): 23—26. [张晋京, 窦森, 曹亚澄. 特定培养条件下土壤有机质分解转化规律的研究. *水土保持学报*, 2004, 18 (5): 23—26.]
- [14] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000, 25—114. [鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000, 25—114.]
- [15] Wang J K. Analysis the relationship between soil salinity and conductivity in Tianjin Xiqing district. *Jilin Water Conservancy*, 2015 (9): 28—32. [王境坤. 天津市西青区土壤含盐量与电导率关系分析. *吉林水利*, 2015 (9): 28—32.]
- [16] Song X Y, Li L Q, Zhang X H, et al. Molecular changes of ferric oxide bound soil humus during the decomposition of maize straw. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2016, 3 (1): 1—7.
- [17] Fang J, Jin L, Cheng L L, et al. Advancement in research on stability of biochar in the environment. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (5): 1034—1047. [方婧, 金亮, 程磊磊, 等. 环境中生物质炭稳定性研究进展. *土壤学报*, 2019, 56 (5): 1034—1047.]

- [18] Liu C T, Hou J W, Suo Q Y, et al. Structure and performance characterization of maize straw biochar-based fertilizer. *Soils*, 2019, 51 (3): 465—469. [刘长涛, 侯建伟, 索全义, 等. 玉米秸秆生物质炭基肥的结构与性质表征. *土壤*, 2019, 51 (3): 465—469.]
- [19] Yan T T, Ding Z J, Zhu Q, et al. Effects of biochar on physicochemical properties of Yellow-brown Soil and growth of *Cinnamomum camphora* seedlings. *Soils*, 2018, 50 (4): 681—686. [严陶韬, 丁子菊, 朱倩, 等. 生物质炭对黄棕壤理化性质及龙脑樟幼苗生长的影响. *土壤*, 2018, 50 (4): 681—686.]
- [20] Zhang Q M, Chen R X, Guan C W, et al. Effects of different organic materials on soil improvement and tobacco yield and quality. *Soils*, 2018, 50 (5): 929—933. [张启明, 陈仁霄, 管成伟, 等. 不同有机物料对土壤改良和烤烟产质量的影响. *土壤*, 2018, 50 (5): 929—933.]
- [21] Senesi N, Plaza C, Brunetti G, et al. A comparative survey of recent results on humic-like fractions in organic amendments and effects on native soil humic substances. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39 (6): 1244—1262.
- [22] Liang Y, Han X Z, Song C, et al. Impacts of returning organic materials on soil labile organic carbon fractions redistribution of mollisol in northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (17): 3565—3574. [梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响. *中国农业科学*, 2011, 44 (17): 3565—3574.]
- [23] Zhao L. Effect of different organic materials on soil fertility. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2012. [赵亮. 不同有机物料对土壤肥力的影响. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.]
- [24] Madari B E, Lima L B, Silva M A S, et al. Carbon distribution in humic substance fractions extracted from soils treated with charcoal (biochar). // Xu J, Wu J, He Y, et al. Functions of natural organic matter in changing environment. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013: 1003—1006.
- [25] Jindo K, Suto K, Matsumoto K, et al. Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure. *Bioresource Technology*, 2012, 110: 396—404.
- [26] Tadini A M, Nicolodelli G, Mounier S, et al. The importance of humin in soil characterisation: A study on Amazonian soils using different fluorescence techniques. *Science of the Total Environment*, 2015, 537: 152—158.
- [27] Hayes M H B. Relationships between biochar and soil humic substances. // Xu J, Wu J, He Y, et al. Functions of natural organic matter in changing environment. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013: 959—963.
- [28] Wang J K, Xu Y D, Ding F, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: A review. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 528—540. [汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展. *土壤学报*, 2019, 56 (3): 528—540.]
- [29] Zheng Y Y, Zhang J B, Tan J, et al. Chemical composition and structure of humus relative to sources. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (2): 386—397. [郑延云, 张佳宝, 谭钧, 等. 不同来源腐殖质的化学组成与结构特征研究. *土壤学报*, 2019, 56 (2): 386—397.]
- [30] Zhou G Y, Dou S, Liu S J. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30 (10): 2075—2080. [周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30 (10): 2075—2080.]
- [31] Simonetti G, Francioso O, Nardi S, et al. Characterization of humic carbon in soil aggregates in a long-term experiment with manure and mineral fertilization. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76 (3): 880.
- [32] Song X Y, Liu J T, Jin S G, et al. Differences of C sequestration in functional groups of soil humic acid under long term application of manure and chemical fertilizers in North China. *Soil and Tillage Research*, 2018, 176: 51—56.

(责任编辑: 陈荣府)