

范如芹, 周运来, 李 赞, 等. 秸秆发酵还田提升土壤腐殖质含量与品质[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1095-1101.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2019.05.014

秸秆发酵还田提升土壤腐殖质含量与品质

范如芹, 周运来, 李 赞, 卢 信, 刘丽珠, 张振华

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 为了探究合理的秸秆还田方式, 促进土壤有机碳固定和提升土壤肥力, 基于野外定位试验, 对比研究了江苏省黄棕壤腐殖质各组分碳含量对不同秸秆还田方式(常规秸秆猪粪发酵还田、发酵床秸秆垫料发酵还田、秸秆炭化还田、秸秆直接还田)的响应。结果表明, 与秸秆直接还田相比, 秸秆猪粪发酵还田、发酵床垫料发酵还田和秸秆炭化还田处理土壤表层 0~5.0 cm 全碳含量分别增加了 18.8%、11.0% 和 11.8%。两种秸秆发酵还田方式均增加了胡敏酸 E_4/E_6 值、胡富比与 PQ 值。不同秸秆还田方式对胡敏酸 $\Delta\lg K$ 值无明显影响。秸秆直接还田对土壤腐殖质碳和总有机碳含量无显著影响。说明秸秆发酵还田方式, 尤其是秸秆猪粪发酵还田, 在增加土壤胡敏酸含量的同时提升了腐殖质品质, 秸秆炭化还田可提高腐殖质腐殖化程度。

关键词: 秸秆还田; 秸秆有机肥; 生物炭; 腐殖质组分; 土壤有机碳

中图分类号: S141.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2019)05-1095-07

Straw fermentation incorporation improves soil humus content and quality

FAN Ru-qin, ZHOU Yun-lai, LI Yun, LU Xin, LIU Li-zhu, ZHANG Zhen-hua

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: To comprehensively study the effects of straw incorporation methods on soil organic carbon (SOC) sequestration and soil fertility, a field experiment was carried out on yellow-brown soil in Jiangsu province, and the response of carbon content in humic substances to different straw incorporation methods including the common straw and manure compost organic fertilizer (OF), straw-based spent pig litter compost fertilizer (SP), straw biochar with chemical fertilizer (BR), raw straw incorporation with chemical fertilizer (CF), were compared in a rice-wheat rotation system. Results showed that in the top soil layer (0-5.0 cm), SOC contents under OF, SP, BR treatments were 18.8%, 11.0% and 11.8% higher than those under CF treatment, respectively. The E_4/E_6 values, HA/FA ratio and PQ values were increased under OF and SP treatments. The effects of different straw return modes on the $\Delta\lg K$ value of humic acid were not significant. Raw straw incorporation had no significant effect on the contents of carbon in humic substances and in bulk soil. In conclusion, the treatment of straw fermentation incorporation, especially the OF, can effectively increase the content of soil fuming acid and improve the quality of humic substances, and straw biochar can increase humification degree of humic substances.

Key words: straw returning; straw-based spent pig litter compost; biochar; humus composition; soil organic carbon

收稿日期: 2018-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401259); 江苏省自然科学基金项目(BK20161379); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(17)3019]; 农业部农业环境重点实验室开放基金项目

作者简介: 范如芹(1984-), 女, 山东临沂人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤有机碳固定研究。(E-mail) fanruqin2007@126.com

通讯作者: 张振华, (E-mail) zhenhuaz70@hotmail.com

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)对土壤结构维系、养分供应等土壤功能和一系列物理、化学和生物功能都具有重要作用。以腐殖质碳为主体的

SOC 还对土壤环境和全球变化产生深刻影响^[1]。腐殖质对农作物根系生长、养分吸收和农作物品质提升等具有重要促进作用^[2-3]。研究土壤腐殖质碳的含量以及组分变化,是揭示秸秆还田等农田管理措施对 SOC 影响机制的一个重要途径。

中国秸秆产量大,且呈逐年增多趋势,秸秆还田成为政府和农业工作者大力倡导的土壤培肥途径之一。秸秆还田可有效降低土壤容质量,增加土壤总孔隙度,使耕层土壤变得疏松^[4]。不同的秸秆还田方式对 SOC 固定的影响及其机理等方面的研究则是国内外学者关注的热点。秸秆直接还田是最为简单易行的秸秆处置措施^[5],但大量研究结果表明,大量秸秆不经发酵等处理直接还田会导致秸秆在短时间内无法腐烂分解成为土壤有机碳,同时也带来耕作障碍和有机酸积累等不利影响^[6]。秸秆炭化还田可减少秸秆燃烧释放的 CO₂ 并增加土壤碳截留^[7-10],但对土壤腐殖质碳组分和性质的影响仍不清晰^[11],尤其与其他秸秆还田方式的对比研究比较缺乏。秸秆作为垫料进行发酵是发酵床养殖的重要内容,消纳养殖废弃物和秸秆的同时生产有机肥,被广泛采纳;同时,秸秆不经发酵床而直接与猪粪进行发酵也是常见的有机肥发酵方式之一^[12]。秸秆与畜禽粪便等高温发酵过程中秸秆中的纤维素和木质素等逐渐分解^[13-14],同时

畜禽粪便的加入也调节了碳氮比等条件,活性有机物质含量远远超过秸秆直接还田和炭化还田,可能引起更为强烈的“激发效应”而导致大量 SOC 矿化^[15],对 SOC 的影响十分复杂,受到广泛关注。可见,秸秆还田因物料自身性质、分解程度和微生物可利用性等的不同,对 SOC 组分含量和性质可产生截然不同的影响。有关秸秆还田对 SOC 固定的贡献和机理问题,有待研究阐明^[16-18]。

为寻求最佳的秸秆还田方式以提高土壤固碳潜力,本研究在黄棕壤稻-麦轮作典型区域设置秸秆炭化(生物炭)还田、养猪发酵床秸秆垫料发酵还田、常规秸秆-猪粪发酵还田和秸秆直接还田 4 种处理,研究各秸秆还田方式下土壤腐殖质碳的变化,以期合理利用秸秆、提高农业土壤碳库质量提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于江苏省农业科学院六合实验基地(32°29'N, 118°37'E)。小区秸秆还田试验开始于 2015 年夏。试验区年平均气温 15.5℃,年降水量 979.5 mm,年日照时长 2 199.5 h,年无霜期 229 d。种植方式为稻-麦轮作。供试黄棕壤和秸秆材料性状见表 1。

表 1 还田物料与土壤的基本性状

Table 1 Basic properties of the tested soil and straw materials

材料	容质量 (g/cm ³)	电导率 (S/m)	pH 值	全碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)
常规秸秆猪粪有机肥	0.15	6.07	7.16	351	42.10	2 792	15 440	2 066
秸秆发酵床垫料	0.27	6.89	6.89	301	38.80	2 572	5 910	1 412
秸秆生物炭	0.31	1.03	9.96	793	9.70	17	8 883	1 302
直接还田秸秆	—	—	—	521	7.68	1 003	2 370	620
土壤	1.30	1.01	7.17	7.35	0.67	83	108	1

1.2 试验设计

设置 4 种秸秆还田方式:常规秸秆猪粪发酵还田(OF)、养猪发酵床秸秆垫料发酵还田(SP)、秸秆炭化还田(BR)和秸秆直接还田(CF),以秸秆不还田为对照(CK)。每个小区面积为 96 m²。每个处理 4 次重复。BR 处理中,生物炭为秸秆在低氧环境下高温(600℃)分解而成;OF 处理中,秸秆与猪粪以 1:1(干物质量)比例混合发酵;SP 处理中,秸秆作为垫料投入到猪圈地面后,在猪粪尿投入及猪

踩踏等活动影响下不断腐解发酵,2 年后垫料出圈并在棚内再次高温堆放发酵熟化。供试物料在作物播种前撒施到田块表面,翻耕(深度 20 cm)后耙平。供试秸秆均为当季作物秸秆,即小麦播种前为水稻秸秆,水稻播种前为小麦秸秆。各试验小区采用独立灌排水系统。SP 处理:施用发酵床垫料有机肥 7.29 t/hm²;OF 处理:施用常规秸秆猪粪发酵有机肥 5.21 t/hm²;BR 处理:施用炭化秸秆 1.46 t/hm²并补充复合肥[(NH₄)₂SO₄ + Ca(H₂PO₄)₂ + KCl]

1.41 t/hm²;CF 处理:除秸秆直接还田(每季施秸秆 7.50 t/hm²)外施用复合肥 1.50 t/hm²,CK:秸秆不还田。各处理氮、磷、钾用量分别为 185 kg/hm²、50 kg/hm²和 160 kg/hm²。水稻品种为南粳 9108,行距 20 cm,密度 1 hm² 2.49×10⁵株。小麦品种为宁麦 15,行距 25 cm,密度 1 hm² 3.00×10⁴株。

1.3 样品采集与分析

于 2017 年水稻收获季利用取土钻取土。土钻一次钻到所需深度,按深度分切土柱为 3 段(0~5.0、5.1~10.0、10.1~20.0 cm)并分别收集。每小区 7 个取样点重复,呈 S 形分布,7 个取样点样品混合成一个样品。样品采集后用自封袋带回实验室,风干后用于 SOC 和腐殖质的测定。

取风干土壤样品,剔除杂质,研磨过筛(100 目),用元素分析仪测定总碳含量。由于黄棕壤中碳酸盐含量可忽略不计,因此总碳含量可视为 SOC 含量。腐殖质及其组分提取与测定方法^[19]为:称取 5 g 风干土壤样品,过 60 目筛,加入蒸馏水(土:水=1:6,质量体积比)搅匀后振荡提取 1 h(70 ℃,145 r/min),3 500 r/min 离心 15 min,上清液过滤至 50 ml 容量瓶中,用蒸馏水洗涤残渣,过滤到同一容量瓶,定容,得到水溶性物质。向剩余残渣中加入 0.1 mol/L NaOH 和 Na₄P₂O₇混合液 30 ml,重复上述振荡提取、过滤、洗涤和定容步骤,得到腐殖质。离心管中沉淀为粗胡敏素。通过 1 mol/L H₂SO₄和 0.05 mol/L NaOH 溶液反复调节 pH、洗涤沉淀、定容、静置等步骤,从提取的腐殖质中得到富里酸和胡敏酸。用紫外分光光度计测定胡敏酸溶液的吸光度^[14]。用差减法求得胡敏素含量,用 TOC 分析仪测定液体样品中碳含量。

1.4 数据分析

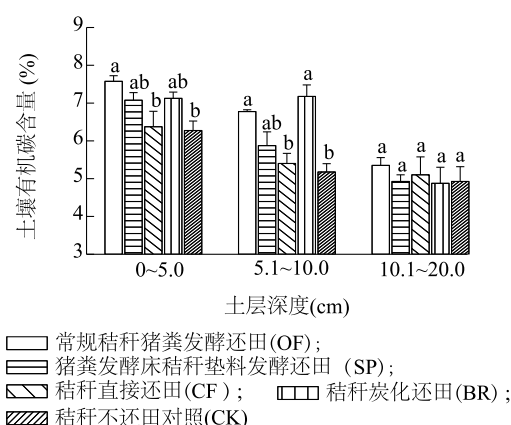
用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析,并进行 LSD 差异显著性检验。用 SigmaPlot 12.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式下土壤有机碳(SOC)含量变化

与 CK 相比,除秸秆直接还田(CF)外,其他秸秆还田方式均能有效提高表层 SOC 含量(图 1)。在表层 0~5.0 cm,与 CF 相比,OF、SP 和 BR 处理 SOC 含量分别提高 18.8%、11.0%和 11.8%。5.1~10.0 cm 土层 BR 处理 SOC 含量最高,且显著高于

CK 和 CF 处理($P<0.05$)。各处理有机碳在土壤剖面分层现象明显,其含量随土壤深度迅速降低。耕作底层土壤 SOC 含量随不同秸秆还田方式变化不显著。OF、SP、BR、CF 和 CK 处理土层间的变异系数分别为 17.2%、20.91%、20.6%、11.9% 和 13.0%。两种秸秆发酵还田方式相比,OF 在 0~5.0 cm、5.1~10.0 cm 和 10.1~20.0 cm 深度均明显高于 SP,其中在 0~5.0 cm 和 5.1~10.0 cm 土层差异达到显著水平。上述结果说明,与 SP 相比 OF 更有利于 SOC 含量的提升。



不同字母表示表示同一土层深度不同处理间在 0.05 水平上有显著差异。

图 1 各秸秆还田处理下土壤总有机碳含量

Fig.1 Contents of soil organic carbon under different straw incorporation treatments

2.2 腐殖质中各组分碳含量对秸秆还田方式的响应

由表 2 可知,随土层的加深,各处理腐殖质组分的碳含量逐渐降低。在表层 0~5.0 cm,两种秸秆有机肥(OF、SP)处理土壤腐殖质含量显著高于 BR 及 CF 处理,且 CF 处理显著高于 BR 处理($P<0.05$);在 5.1~10.0 cm 土层,SP、OF 及 BR 处理亦显著高于 CK 和 CF 处理。在底层 10.1~20.0 cm 各处理差异不显著。BR 处理对水溶性物质组分碳含量的影响高于其他处理,尤其在表层 0~10.0 cm。不同土层中富里酸碳含量不同处理间变化不大,而胡敏酸与胡敏素碳含量变化明显。在上述 3 个土壤深度中,OF 处理胡敏酸碳含量分别比 SP 处理高 30.9%、139.2%和 8.9%($P<0.05$)。SP、OF 及 BR 处理胡敏酸碳含量在耕作表层以及亚表层高于 CF 及 CK 处理。富里酸、胡敏酸和胡敏素组分碳含量

分别占总 SOC 的 15.4%~25.1%、2.3%~6.6% 和 47.2%~89.6%。

表 2 腐殖质和各组分含碳量及其比例对秸秆还田方式的响应

Table 2 Responses of contents of organic carbon in humus components and the corresponding percentage to different straw incorporation treatments

土层深度 (cm)	处理	水溶物质		富里酸		胡敏酸		胡敏素		腐殖物质	
		含量 (mg/kg)	百分比 (%)	含量 (mg/kg)	百分比 (%)	含量 (mg/kg)	百分比 (%)	含量 (mg/kg)	百分比 (%)	含量 (mg/kg)	百分比 (%)
0~5.0	OF	486.3b	6.5	1 273a	17.1	494.3a	6.6	4 360b	58.4	1 171.0a	15.7
	SP	444.1b	7.8	1 293a	18.5	377.7b	5.4	4 674b	66.8	1 157.0a	16.5
	CF	492.9b	8.1	1 270a	20.9	299.7c	4.9	4 061bc	62.8	889.1b	14.7
	BR	543.3a	7.7	1 159a	16.4	261.8d	3.7	5 213a	73.8	747.9c	10.6
	CK	488.9b	8.0	1 289a	21.0	290.5cd	4.7	3 681c	60.0	836.6bc	13.6
5.1~10.0	OF	482.6ab	7.1	1 047a	15.4	337.2a	5.0	4 659a	89.6	837.8a	13.7
	SP	478.6ab	7.7	1 293a	20.9	140.9c	2.3	4 111ab	86.3	828.9a	13.4
	CF	471.8b	9.1	1 264a	24.3	282.8b	5.4	3 004c	63.9	753.7b	12.4
	BR	511.5a	7.4	1 343a	19.4	347.8a	5.0	3 925b	85.3	807.5a	11.4
	CK	430.0c	7.1	1 054a	17.4	279.6b	4.6	3 103c	64.9	697.9b	11.4
10.1~20.0	OF	466.3a	9.0	1 024a	19.7	262.5a	5.0	2 452a	47.2	568.2a	10.9
	SP	444.2a	9.3	1 064a	22.3	241.0a	5.1	2 512a	52.7	566.4a	11.9
	CF	462.3a	9.8	1 180a	25.1	180.5b	3.8	2 634a	56.1	540.9a	10.5
	BR	428.9a	9.3	1 009a	21.9	60.8c	6.6	2 499a	54.3	537.6a	10.0
	CK	446.1a	9.2	1 054a	21.7	54.0c	5.3	2 349a	51.9	521.2a	9.8

各处理见图 1 注。不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上有显著差异。

2.3 土壤胡富比与 PQ 值对秸秆还田方式的响应

不同还田方式对耕层 0~10.0 cm 的 PQ 值及胡富比的影响明显(图 2)。在表层 0~5.0 cm, OF 处理 PQ 值与胡富比最高,且显著高于 CF、BR 和 CK 处理($P < 0.05$); OF 处理胡富比与 PQ 值分别比 SP 处理高 17.5%和 22.3%;与 CF 和 BR 处理相比,秸秆发酵还田(OF 和 SP 处理)能有效提高土壤胡富比及 PQ 值。在 5.1~10.0 cm 土层,胡富比与 PQ 值变化规律不同于耕作表层,SP 处理的胡富比与 PQ 值显著低于其他 3 种秸秆还田处理。耕作底层(10.1~20.0 cm)各处理差异不明显($P > 0.05$)。

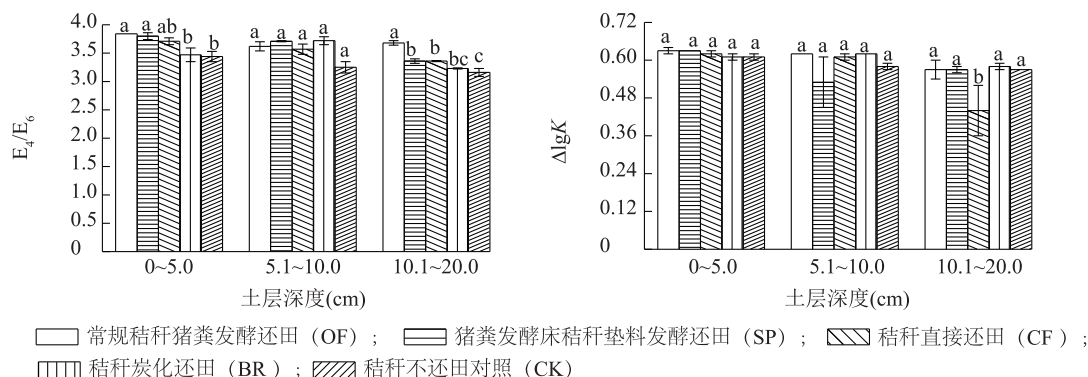
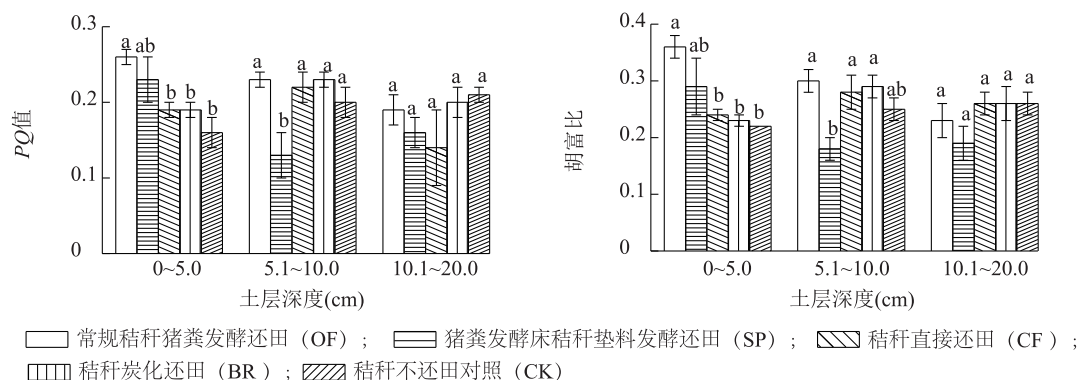
2.4 胡敏酸色调系数 $\Delta\lg K$ 与 E_4/E_6 值对秸秆还田方式的响应

由图 3 可见,胡敏酸 E_4/E_6 值对还田方式响应敏感程度高于色调系数。在耕作表层 0~5.0 cm 不同处理下 E_4/E_6 值有显著差异, BR 处理低于其他处理,且显著低于两种秸秆发酵还田处理,一定程度上反映了 BR 处理的腐殖质高复杂程度和缩合度。在 5.1~10.0 cm 土层胡敏酸的 E_4/E_6 值及色调系数 $\Delta\lg K$ 各处理间差异不明显,不同处理的数值分别在

3.25 至 3.72 之间和 0.53 至 0.62 之间。在 10.1~20.0 cm 土层, OF 处理 E_4/E_6 值最高,且显著高于其他 4 个处理,说明该处理促进了土壤腐殖质缩合度的降低。

3 讨论

本研究分析了土壤有机碳(SOC)含量、腐殖物质及其组分对不同秸秆还田方式的响应。各秸秆还田方式均能不同程度增加 SOC 含量,这与其他研究者在江苏黄棕壤农田进行的秸秆还田试验结果一致^[20]。路文涛等^[21]报道,与秸秆不还田相比,3 年秸秆还田有效提高了 0~20 cm 土壤 SOC 含量。说明大量秸秆碳投入可有效提高 SOC 含量。SOC 积累对各秸秆还田方式的响应差异明显,发酵还田和炭化还田效果明显优于直接还田。大量其他研究结果也表明秸秆炭化还田在增加 SOC 方面有一定优势^[22-23],但是关于秸秆猪粪发酵还田与养猪发酵床秸秆垫料发酵还田之间的对比研究较少。本研究发现常规秸秆猪粪发酵还田比养猪发酵床秸秆垫料发酵还田更具优势。



不同秸秆还田方式下,总 SOC 和腐殖质组分有机碳含量随土层加深而下降,原因可能在于表层作物凋落物等有机质输入较底层多,且越接近表层土壤水温气热波动越大,土壤微生物活动剧烈,使得土壤表层有机质更易分解为土壤有机质的一部分;同时,秸秆还田的机械扰动可导致腐殖质中活性碳组分首先矿化分解^[24]。与他人结果^[25-26]不同的是,本研究中秸秆直接还田并未提升 SOC 含量,这可能与本研究还田时间较短有关,未经发酵等处理直接还田的秸秆腐解需要较长时间。

刘敏等发现,有机物配施化肥能有效改善土壤腐殖质品质,但生物炭处理效果不理想^[27]。本研究发现,两种单施有机肥的秸秆发酵还田处理可有效增加土壤腐殖质含量,这与他人研究结果一致^[27]。

腐殖质的胡富比和 PQ 值是评价其品质的关键指标,该值越大品质越好^[28-29]。本研究中不同秸秆还田方式均有助于提高黄棕壤胡敏酸和富里酸碳含量,提高胡敏酸的效果更明显,有效提高了胡富比和 PQ 值。其中秸秆猪粪发酵还田效果最为明显,养猪发酵床秸秆垫料发酵还田次之,说明秸秆还田尤其是秸秆猪粪发酵还田有利于促进表层土壤胡敏酸含量和腐殖质品质。在亚表层以及耕作底层,养猪发酵床秸秆垫料发酵还田的 PQ 值和胡富比有所降低。有机质含量高的腐殖质中胡敏酸含量较高^[30]。不同还田方式的秸秆在短期内熟化程度不同,对土壤腐殖质的影响也不同,而且在表层效果更为明显。胡敏酸的 E_4/E_6 值和色调系数 $\Delta \lg K$ 也表现出此变化规律,这 2 个值越小则表明胡敏酸结构越复

杂^[31]。有研究者发现,秸秆等有机物料还田可促进腐殖质的活化,使其向年轻化方向发展^[32-34],这与本研究结果一致。周桂玉等^[35]通过室内培养试验发现,秸秆生物炭可提高 SOC、胡敏酸、富里酸及有效养分等含量,并降低胡敏酸的 $\Delta \lg K$ 值。秸秆生物炭还田可降低胡敏酸氧化程度,增加其缩合度和芳香性^[36]。本研究中胡敏酸的 E_4/E_6 值和 $\Delta \lg K$ 在秸秆炭化还田处理中降低最为显著,说明秸秆生物炭施用有助于对 SOC 的长期保存。供试土壤腐殖质各个组分中,胡敏素的变化对总 SOC 变化的贡献最大,对不同秸秆还田方式的响应也较为敏感,可作为指示 SOC 和腐殖质对土壤管理措施响应的重要指标。

综上所述,秸秆发酵还田与炭化还田均能有效提高 SOC 含量并增加土层间 SOC 变异系数。两种秸秆发酵还田处理,尤其秸秆猪粪发酵还田,可显著提高胡敏酸和腐殖酸碳含量,而炭化还田可有效提高腐殖质的缩合度和复杂程度,有助于促进 SOC 固定。与秸秆不还田相比,秸秆直接还田在提高 SOC 组分和质量方面未表现出效果,但长期效果有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 吕贻忠,李保国. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2006: 151-157.
- [2] 窦森,周桂玉,杨翔宇,等. 生物质炭及其与土壤腐殖质碳的关系[J]. 土壤学报,2012,49(4): 796-802.
- [3] 袁铭章,辛励,刘树堂,等. 长期秸秆还田不同施肥对土壤腐殖质含量及结构的影响[J]. 华北农学报,2016,31(5): 205-209.
- [4] 朱琳,刘春晓,王小华,等. 水稻秸秆沟埋还田对麦田土壤环境的影响[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(4): 399-403.
- [5] 孙小祥,常志卅,靳红梅,等. 太湖地区不同秸秆还田方式对作物产量与经济效益的影响[J]. 江苏农业学报,2017,33(1): 94-99.
- [6] 于建光,李辉信,胡锋. 秸秆施用及蚯蚓活动下土壤有机碳变化表征指标的筛选[J]. 土壤学报,2007,44(5): 115-121.
- [7] 季雅岚,索龙,解钰,等. 3 种豆科植物生物质炭对海南砖红壤性质及 N_2O 排放的影响[J]. 南方农业学报,2017,48(8): 1381-1387.
- [8] LU W W, DING W X, ZHANG J H, et al. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: A negative priming effect [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 76: 12-21.
- [9] 马小婷,隋玉柱,朱振林,等. 秸秆还田对农田土壤碳库和温室气体排放的影响研究进展[J]. 江苏农业科学,2017,45(6): 14-20.
- [10] GRUTZMACHER P, PUGA A, SILVEIRA B M, et al. Carbon stability and mitigation of fertilizer induced N_2O emissions in soil amended with biochar [J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 1459-1466.
- [11] KANTHLE A K, LENKA N K, LENKA S, et al. Biochar impact on nitrate leaching as influenced by native soil organic carbon in an Inceptisol of central India [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 157: 65-72.
- [12] ROGOVSKA N, LAIRD D A, RATHKE S J, et al. Biochar impact on Midwestern Mollisols and maize nutrient availability [J]. Geoderma, 2014, 230: 340-347.
- [13] 张亮,林宁,杜茜,等. 农作物秸秆高温堆肥生产有机肥及肥效研究[J]. 贵州农业科学,2015,43(7): 91-96.
- [14] 王虎,王旭东,田宵鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. 中国应用生态学报,2014,25(12): 3491-3498.
- [15] KUZYAKOV Y, FRIEDEL J K, STAHR K. Review of mechanisms and quantification of priming effects [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 1485-1498.
- [16] GONG W, YAN X Y, WANG J Y, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China [J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 318-324.
- [17] 周运来,张振华,范如芹,等. 秸秆还田方式对水稻田土壤理化性质及水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报,2016,32(4): 786-790.
- [18] 陈晶培,刘树堂,辛励,等. 长期定位秸秆还田不同施肥处理对土壤腐殖质组分含量的影响[J]. 华北农学报,2016,31(5): 180-185.
- [19] 窦森,于水强,张晋京. 不同 CO_2 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. 土壤学报,2007,44(3): 458-466.
- [20] 徐将来,胡乃娟,张政文,等. 连续秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分及碳库的影响[J]. 土壤,2016,48(1): 71-75.
- [21] 路文涛,贾志宽,张鹏,等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(3): 522-528.
- [22] 张鹏,李涵,贾志宽,等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(12): 2518-2525.
- [23] WU M, HAN X, ZHONG T, et al. Soil organic carbon content affects the stability of biochar in paddy soil [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 223: 59-66.
- [24] 赵红,郑殷恬,吕贻忠,等. 免耕与常规耕作下黑土腐殖酸含量与结构的差异[J]. 生态环境学报,2010,19(5): 1238-1241.
- [25] GHANI A, DEXTER M, PERROTT K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1231-1243.

- [26] 侯晓静,杨劲松,赵 曼,等. 不同施肥措施对滨海盐渍土有机碳含量的影响[J]. 土壤,2014,46(5):780-786.
- [27] 刘 敏,杨永锋,陈红丽. 不同有机物配施化肥对植烟土壤腐殖质碳的影响[J]. 河南农业科学,2017,46(2):38-42.
- [28] ANDERSON D W, PAUL E A. Organo-mineral complexes and their study by radio carbon dating[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(2): 298-301.
- [29] 褚 慧,宗良纲,汪张懿,等. 不同种植模式下菜地土壤腐殖质组分特性的动态变化[J]. 土壤学报,2013,50(5):931-939.
- [30] 李 凯,窦 森. 不同类型土壤胡敏素组成的研究[J]. 水土保持学报,2008,22(3):116-119,157.
- [31] CHEN Y, SENESI N, SCHNITZER M. Information provided on humic substances by E_4/E_6 ratios [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(2): 352-358.
- [32] CUI T, LI Z, WANG S. Effects of in-situ straw decomposition on composition of humus and structure of humic acid at different soil depths [J]. Journal of Soils and Sediments,2017,17(10): 1-9.
- [33] 路 丹,何明菊,区惠平,等. 耕作方式对稻田土壤活性有机碳组分、有机碳矿化以及腐殖质特征的影响[J]. 土壤通报,2014,45(5):1144-1150.
- [34] 史振鑫,孟安华,吴景贵,等. 牛粪处理方式对黑土胡敏酸和富里酸的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(3):145-151.
- [35] 周桂玉,窦 森,刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(10):2075-2080.
- [36] 孟凡荣,窦 森,尹显宝,等. 施用玉米秸秆生物质炭对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. 农业环境科学学报,2016,35(1):122-128.

(责任编辑:张震林)