

不同耕作模式对东北黑土腐殖质结合形态的影响

任 玲, 吴景贵*, 吕东波, 张永刚, 孙继梅, 李喜彦

(吉林农业大学资源与环境学院/吉林省商品粮基地资源可持续利用重点实验室, 长春 130118)

摘 要:通过田间试验,研究不同耕作模式对东北黑土腐殖质结合形态的影响。采用熊毅-傅积平改进的结合态腐殖质分组法提取土壤中腐殖质,再分别进行有机碳含量测定。试验结果表明:不同耕作模式下黑土腐殖质含量不同,其中松结态、联结态腐殖质含量变化均很小,稳结态、紧结态腐殖质含量则出现较大的变化。二者含量均以C(地膜覆盖+常规播种)处理值最高;对胡富比(H/F)的影响则表现为对松结态的影响较小,只有C(地膜覆盖+常规播种)、D(覆膜滴灌+常规播种)处理与F(覆膜滴灌+秸秆鸡粪)处理之间有显著差异,对联结态和稳结态的影响较大,差异显著;不同耕作模式对黑土E4/E6的影响不大,其中松结态和稳结态E4/E6无明显变化,只有联结态E4/E6中E、F处理与A(常规耕作+常规播种)处理之间有显著差异。耕作模式不同,腐殖质各形态的含量不同。其中C处理整体表现最优,提高了各结合形态腐殖质含量。

关键词:耕作模式;腐殖质;腐殖质结合形态

中图分类号: S153.6'22

文献标识码: A

文章编号: 1003-8701(2016)00-0050-06

Effects of Different Cultivated Modes on Combined States of Humus in Black Soil

REN Ling, WU Jinggui*, LYU Dongbo, ZHANG Yonggang, SUN Jimei, LI Xian

(College of Resources and Environmental Science, Jilin Agricultural University / Key Lab of Sustainable Utilization of Resources in Commercial Grain Production Base of Jilin Province, Changchun 130118, China)

Abstract: The aim of the field experiment was to investigate the effects of different cultivated modes on the combined states of humus of phaeozem in northeast China. Soil humus was extracted adopted grouping method of humus combined forms modified by Xiong Yi- Fu Jiping, then the soil organic carbon contents were determined respectively. Experimental results showed that the content of humus of phaeozem in different cultivated modes was different. Among them, there were little variation in the content of loosely-combined humus and unitedly-combined humus, but there were great changes in the content of stably-combined humus and tightly-combined humus. C value was the highest in the content of them. The influence to HA/FA showed little impact on loosely-combined humus and great impact on unitedly-combined humus and stably-combined humus because of the significant differences between the disposal of C, D and F. Different cultivated modes had little effect on E4/E6 in black soil, and the E4/E6 of loosely-combined humus and stably-combined humus had no obvious change, only in the unitedly-combined humus of E4/E6 were there significant differences between the disposal of E, F and A. The cultivated modes were different, so the contents of various forms of humus were different. Among them, overall performance of C treatment was the best, which improved the content of different combined humus.

Key words: Cultivated modes; Humic substance; Combined forms of humus

收稿日期: 2015-12-08

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B05、2013BAC09B01); 吉林省科技厅重点科技成果转化项目(20130303035NY)

作者简介: 任 玲(1990-), 女, 在读硕士, 主要从事农业废弃物资源化与土壤有机耕作研究。

通信作者: 吴景贵, 男, 博士, 教授, E-mail: wujingguiok@163.com

土壤有机质是土壤肥力的基础物质^[1-2]。土壤腐殖质是土壤有机质的重要组成部分,对土壤肥力、结构和性质具有调节功能,在土壤养分循环和农业生态系统稳定平衡方面发挥着重要作用。土壤有机质的变化因土壤类型、肥料种类与配比、施肥量和作物耕作方式等而异^[3-5]。土壤有机碳组分不同,土壤腐殖质的结合方式和松紧程度

不同,可分为松结态、联结态、稳结态和紧结态4种结合形态的腐殖质,各种结合形态腐殖质含量在土壤中总腐殖质的比例对腐殖质形成过程及肥力特性上有着重要意义^[6-7]。目前多用化学浸提剂浸提腐殖质进行分类研究^[8]。但国外有关资料表明,不同耕作措施对土壤腐殖质类物质含量、组成、结合形态均有影响^[9-10]。Clark等^[11]通过8年的田间定位试验发现有机种植能够明显提高土壤有机碳的含量,而常规耕作模式对土壤有机碳影响没有明显变化。Pimentel等^[12]也得出了相同的结论。褚慧等^[13]经过9年的长期定位试验,得出有机种植模式的土壤有机碳及腐殖质组分碳含量随着种植时间的延长而增加,增加率要高于常规种植模式;而常规种植模式的相应指标变化不显著。此外,研究不同耕作模式下黑土腐殖质结合形态的组成和含量特征具有重要的科学意义和应用前景。而且国内相关的报道也较少,本文较详细地研究了不同耕作模式对黑土腐殖质结合形态的影响,为探索提高土壤质量的最优耕作模式提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于吉林省四平市梨树县中国农业大学试验站(43°17'N,124°26'E),该试验是定位试验。气候类型属于温带半湿润大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季炎热多雨,春季风沙较大,秋季气候凉爽。年平均气温5.8℃,≥10℃年积温3 477.9℃·d,年日照时数达2 698.5 h,无霜期平均152 d。年均降水量577.2 mm,当季降雨量511.4 mm。热源充足,雨量适中,雨热同季。地势平坦,土质肥沃,是辽阔的米粮川,为吉林省黄金玉米带的主要地段之一。试验地土壤基本理化性质如下:土壤类型为黑土,pH6.87,有机质、全氮分别为24.41、1.23 g/kg。碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为129、33.45、194 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于2013年5月初开始播种,10月1日收获,田间管理同大田管理。供试作物为玉米先玉335。采用随机区组设计。共设六个处理,即A:常规耕作+常规播种;B:常规耕作+秸秆鸡粪;C:地膜覆盖+常规播种;D:覆膜滴灌+常规播种;E:地膜覆盖+秸秆鸡粪;F:覆膜滴灌+秸秆鸡粪。六个处理中地表分别做常规、覆膜以及覆膜滴灌三种方式,地下部分为常规、秸秆鸡粪两种方式。

各处理为地表与地下部分两两组合。小区面积为90 m²,每区3垄,垄长25 m,垄距120 cm,设4次重复。化肥N:P:K=130 kg/hm²:65 kg/hm²:60 kg/hm²。

试验用肥料:鸡粪有机质平均含量为396.50 g/kg,全氮含量2.14 g/kg,P₂O₅含量为1.87 g/kg,K₂O含量为0.97 g/kg;玉米秸秆有机质平均含量为589 g/kg,全氮含量10.17 g/kg,P₂O₅含量7.39 g/kg,K₂O含量21.63 g/kg。

1.3 样品采集与测定

在玉米收获期分别在每个小区内采集0~20 cm土样(10份),每个小区以“S”形采取10个样点,混匀后用自封袋密封,带回实验室后将土样过2 mm筛,风干保存备用。于2014年7月初开始分析土壤腐殖质结合形态,试验周期大概一个月。土壤基本理化性质采用常规方法测定^[14]。土壤腐殖质分组步骤如下(熊毅法):六个处理分别称取5 g土壤放入100 mL离心管(3次重复),加入50 mL 0.1 mol/L NaOH溶液,摇晃均匀,放到30℃恒温箱静置过夜。第二天离心(3 000 r/min,15 min),得到的提取液放入250 mL容量瓶,土壤反复加0.1 mol/L NaOH溶液50 mL(3~4次),提取液接近无色为宜。提取部分即松结态腐殖质(I)。分离I组后剩余的土壤,加0.1 mol/L NaOH和0.1 mol/L Na₂SO₄的混合液(pH13),摇晃均匀后放到30℃保温箱内放置过夜,第二天离心。如悬液混浊,可加少量饱和Na₂SO₄溶液,搅匀后再离心。如此反复处理(约4次),直至提取液接近无色。提取部分即联结态腐殖质(II)。I、II组腐殖质后剩余的土壤,加入50 mL 0.1 mol/L NaOH和0.1 mol/L Na₂SO₄的混合液,超声波处理即得到稳结态腐殖质。残留的为紧结态腐殖质。各组分有机碳、胡敏酸含量用重铬酸钾容量(外加热)法测定,富里酸含量用差减法计算;可见光区吸光特性测定采用Kumada法^[15](用721分光光度计测定465 nm、665 nm的吸光值,并计算E4/E6)。

1.4 数据处理

数据经Excel 2003处理后,采用DPSv 7.05统计软件进行统计分析,采用Duncan新复极差5%水平的差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 黑土松结态腐殖质

2.1.1 黑土松结态腐殖质含量

黑土松结态腐殖质含量的高低,标志着土壤腐殖质的活跃程度,松结态腐殖质含量越高,表

明土壤腐殖质比较活跃,能释放的养分越多,土壤肥力越高。由图1可知,不同有机物料处理对土壤松结态腐殖质的含量有较大影响,各处理之间差异显著。大体上看,添加秸秆鸡粪的处理松结态腐殖质含量要优于没添加的(即B、E、F处理含量高于A、C、D处理),加入秸秆鸡粪的处理要显著地高于常规处理。这表明有机物料的添加有利于土壤松结态腐殖质的积累。各处理松结态腐殖质含量以F处理表现最优(0.736 g/kg),其次是E处理(0.688 g/kg),A处理的松结态腐殖质含量最低(0.413 g/kg)。较F处理低了43.86%。各处理含量高低顺序为F>E>B>D>C>A。

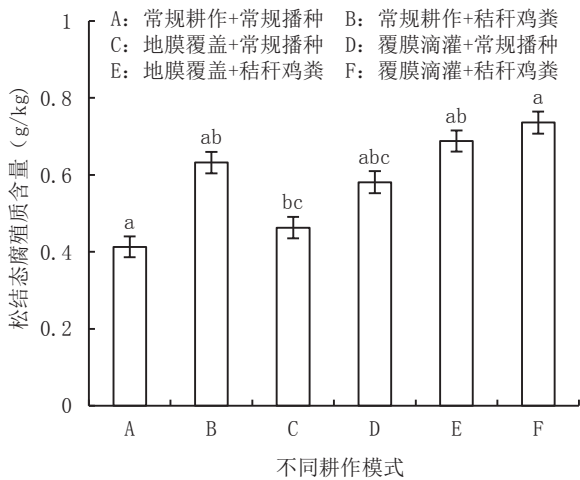


图1 不同栽培模式对黑土松结态腐殖质含量的影响

2.1.2 黑土松结态腐殖质HA、FA以及H/F

土壤H/F(胡富比)作为进一步说明土壤肥力的指标,具有重要意义。由表1可以看出,六个处理中松结态腐殖质的HA和FA含量存在显著差异。HA(胡敏酸)含量以C处理最高(0.17 g/kg),以B处理最低(0.12 g/kg)。各处理的含量高低顺序为C>D=A>E>B>F。各处理中FA(富里酸)的含量以F处理最高(0.51 g/kg),以C处理最低(0.39 g/kg)。

表1 不同栽培模式对黑土松结态腐殖质HA、FA以及H/F的影响

处 理	HA	FA	H/F
A(常规耕作+常规播种)	0.15ab	0.44bc	0.34ab
B(常规耕作+秸秆鸡粪)	0.12c	0.46b	0.26ab
C(地膜覆盖+常规播种)	0.17a	0.39d	0.42a
D(覆膜滴灌+常规播种)	0.15ab	0.43c	0.35a
E(地膜覆盖+秸秆鸡粪)	0.14bc	0.49a	0.28ab
F(覆膜滴灌+秸秆鸡粪)	0.08d	0.51a	0.15b

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05),下同

g/kg),较F处理降低了23.53%。各处理FA的含量高低顺序为F>E>B>A>D>C。不同处理对H/F的影响较为明显,其中以C、D处理表现最好(0.42 g/kg、0.35 g/kg),F处理最低(0.15 g/kg),较C处理减少了64.28%。但是A、B、C、D、E处理之间没有显著差异,A、B、E、F处理之间也没有显著差异,C、D和F之间差异达到显著水平。

2.1.3 黑土松结态腐殖质E4/E6

由图2可以看出,不同处理条件下黑土松结态腐殖质的E4/E6(腐殖质在波长465 nm和665 nm处的光密度比值)之间均有较大差异。以E处理E4/E6值最高(26.94),与其他处理之间差异显著,其次是F处理(23.91),与其他处理之间也有明显的差异。B、D处理之间差异不显著,但与其他处理之间均有显著差异,A、C处理之间也是呈相同规律。C处理的E4/E6值最小(15.843),较E处理减少了41.19%。各处理E4/E6值高低顺序为E>F>B>D>A>C。

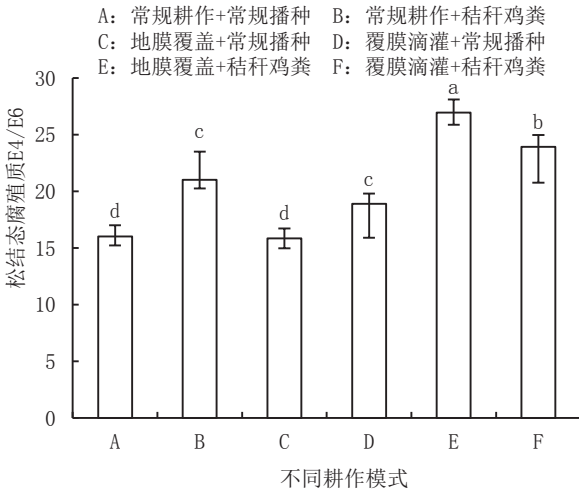


图2 不同栽培模式对黑土松结态腐殖质E4/E6的影响

2.2 黑土联结态腐殖质

2.2.1 黑土联结态腐殖质含量

由图3可以看出,不同耕作模式对土壤联结态腐殖质含量有一定影响。其中B处理土壤联结态腐殖质含量最高(0.234 g/kg),其次是E处理(0.228 g/kg),均与其他处理之间有显著差异,但是二者之间则无明显差异。这表明秸秆和鸡粪的加入增加了土壤联结态腐殖质的含量。F处理施加了秸秆鸡粪,但是联结态腐殖质含量增加不明显,这可能与滴灌浇水有关。各处理中以A、C处理含量最低(均为0.15 g/kg),较含量最高的B处理减少了34.78%。D(0.17 g/kg)、A、C、F(0.18 g/kg)四个处理

之间均无显著差异。但都与B、E两个处理之间差异显著。

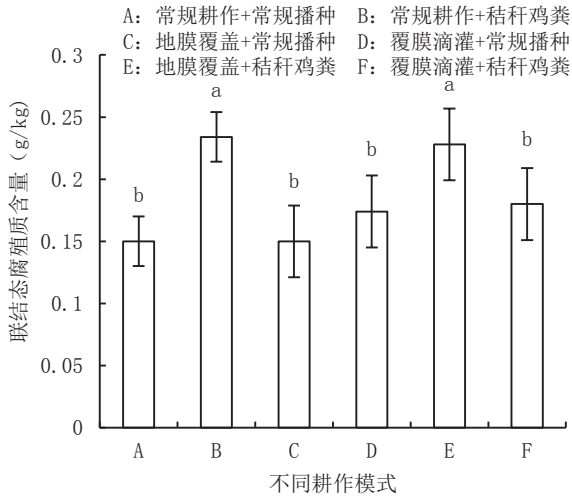


图3 不同栽培模式对黑土联结态腐殖质含量的影响

2.2.2 黑土联结态腐殖质 HA、FA 以及 H/F

由表2可以看出不同耕种模式下黑土联结态腐殖质胡敏酸、富里酸以及胡富比之间均有很大差异。其中A、C、E处理的胡敏酸含量表现最优,较其他三个处理之间达显著差异水平。B、D、F处理之间没有显著差异。六种不同耕种模式下土壤联结态腐殖质含量大小为C>A=E>D>B>F。富里酸含量差异也很大,各处理之间以B处理含量最高(0.19 g/kg),与其他处理之间达显著差异。其次是F处理,再次是E、D处理(二者之间无显著差异)。各处理胡富比以C处理最高,与其他处理之间差异显著,其次是A处理,F处理最低。

表2 不同栽培模式对黑土联结态腐殖质 HA、FA 以及 H/F 的影响

处 理	HA	FA	H/F
A(常规耕作+常规播种)	0.11a	0.04d	3.17b
B(常规耕作+秸秆鸡粪)	0.042b	0.19a	0.27e
C(地膜覆盖+常规播种)	0.14a	0.01e	24.00a
D(覆膜滴灌+常规播种)	0.06b	0.11c	0.53d
E(地膜覆盖+秸秆鸡粪)	0.11a	0.12c	0.90c
F(覆膜滴灌+秸秆鸡粪)	0.02b	0.16b	0.11e

2.2.3 黑土联结态腐殖质 E4/E6

由图4可以看出,不同处理黑土联结态腐殖质E4/E6整体变化幅度不大,A处理与E、F处理之间存在着显著差异性。但与其他处理之间均无明显差异。B、C、D、E、F五个处理之间差异不显著。A、B、C、D四个处理之间也无明显变化。各处理中以E处理E4/E6比值最高,较最低的A处理

高了4%。

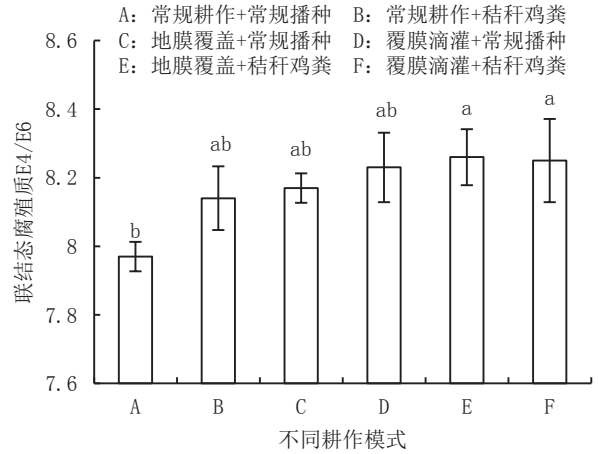


图4 不同栽培模式对黑土联结态腐殖质 E4/E6 的影响

2.3 黑土稳结态腐殖质

2.3.1 黑土稳结态腐殖质含量

由图5可以看出,不同处理下黑土稳结态腐殖质含量差异很大,但是加入鸡粪秸秆和没施加的处理之间无明显的规律性。本研究中C处理稳结态腐殖质含量最高(0.078 mg/kg),其次是E处理(0.066 mg/kg),二者之间差异不显著。这可能与二者都覆盖地膜有关。D、F处理虽也有地膜覆盖,但是同时也有滴灌的水浸作用。这表明扰动土壤不利于稳结态腐殖质的积累。但E处理与B、D、F处理之间均有显著差异,与A处理之间无显著差异。A处理与D处理之间差异不显著,但与B、F处理间有显著差异。不同处理之间稳结态腐殖质含量高低顺序为C>E>A>D>F>B。

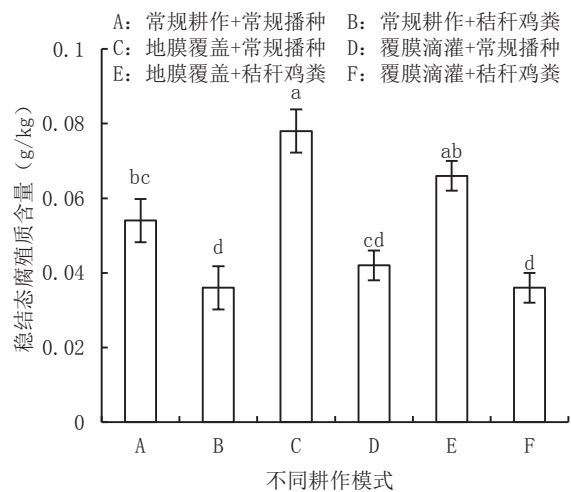


图5 不同栽培模式对黑土稳结态腐殖质含量的影响

2.3.2 黑土稳结态腐殖质 HA、FA 以及 H/F

由表3可知,不同耕作模式下黑土稳结态腐

殖质 HA 以 B、C 处理最高(0.042 g/kg),二者值相等,较其他处理分别高出 85.71%、85.71%、71.42%、28.57%。FA 的含量以 E(0.054 g/kg)、A(0.048 g/kg)处理表现最优,二者之间没有显著差异,但与其他处理之间差异显著。其次是 C、D 处理,二者 FA 值相等(0.036 mg/kg),B、F 处理表现最差,但二者之间无显著差异。不同栽培模式下胡富比则表现为 B 处理最高,其次是 F 处理,D 处理最低。不同处理胡富比高低顺序为 B>F>C>E>D>A。

表 3 不同栽培模式对黑土稳结态腐殖质 HA、FA 以及 H/F 的影响 g/kg

处 理	HA	FA	H/F
A(常规耕作+常规播种)	0.006c	0.048a	0.125d
B(常规耕作+秸秆鸡粪)	0.042a	0.006c	7.000a
C(地膜覆盖+常规播种)	0.042a	0.036b	1.170c
D(覆膜滴灌+常规播种)	0.006c	0.036b	0.167d
E(地膜覆盖+秸秆鸡粪)	0.012c	0.054a	0.222d
F(覆膜滴灌+秸秆鸡粪)	0.030b	0.006c	5.000b

2.3.3 黑土稳结态腐殖质 E4/E6

由表 4 可以看出,不同耕作模式下黑土 E4、E6 值以及 E4/E6 均没有明显变化。各处理之间均没有显著差异。但 E4 值以 C 处理最高(0.068 g/kg),A、B 处理值相等均为 0.06 g/kg。各处理 E6 值以 C、D(0.025 g/kg)处理表现最优。E4/E6 则是以 C 处理表现最高。

表 4 不同栽培模式对黑土稳结态腐殖质 E4/E6 的影响

处 理	E4	E6	E4/E6
A(常规耕作+常规播种)	0.06a	0.022a	2.73a
B(常规耕作+秸秆鸡粪)	0.06a	0.024a	2.5a
C(地膜覆盖+常规播种)	0.069a	0.025a	2.76a
D(覆膜滴灌+常规播种)	0.068a	0.025a	2.72a
E(地膜覆盖+秸秆鸡粪)	0.062a	0.024a	2.58a
F(覆膜滴灌+秸秆鸡粪)	0.058a	0.021a	2.74a

2.4 黑土紧结态腐殖质

紧结态腐殖质具有较强的稳定性,其含量的高低对土壤中腐殖质的累积、养分的贮蓄以及土壤结构的保持有显著作用。由图 6 可知,不同栽培模式下黑土紧结态腐殖质含量差异很大,其中以 C 处理紧结态腐殖质含量最高(2.518 g/kg),与其他处理之间均有显著差异,较其他处理分别高了 82.84%、43.45%、50.83%、53.29%、56.08%。其次是 B 处理(1.424 g/kg),E、F 处理之间没有显著差异。A 处理紧结态腐殖质含量最低(0.432 g/kg)。这

表明秸秆鸡粪的加入和覆膜等方式能够增加土壤紧结态腐殖质的含量。常规耕作则不利于土壤紧结态腐殖质积累,进而土壤肥力下降。

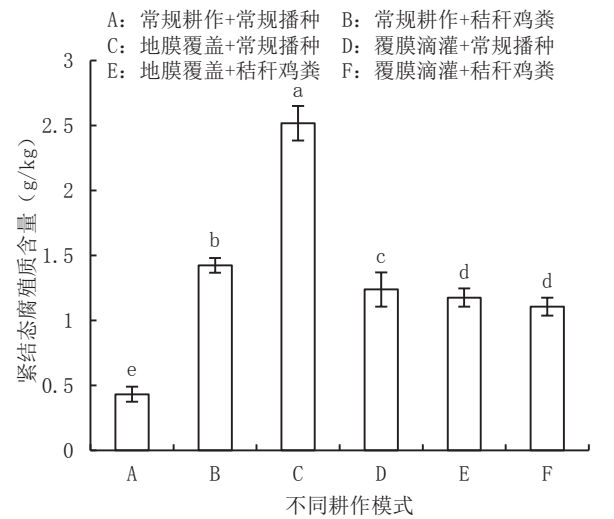


图 6 不同栽培模式对黑土紧结态腐殖质含量的影响

3 讨 论

土壤腐殖质结合形态不同,对土壤结构状况、土壤的肥沃状况影响也不同^[3]。本文研究了不同耕作模式对土壤腐殖质各结合形态的影响,试验结果表明,不同耕作模式下黑土松结态、联结态腐殖质含量变化均很小,稳结态、紧结态腐殖质含量则出现较大的变化。其中以紧结态腐殖质含量为主。这与韩宾等^[8]研究结果相同。试验结果还表明,有机物料的加入增加了土壤松结态腐殖质的含量,其增加的主要原因是耕作使秸秆鸡粪在土壤表层中富集,秸秆腐解产生新的有机碳,因而松结态腐殖质含量显著增加。有研究指出^[16],E4/E6 的高低代表了光密度的大小。光密度则与分子复杂程度呈正相关。光密度越大,芳香核原子团多,缩合度也高。不同耕作模式对黑土 E4/E6 的影响不大,其中松结态和稳结态 E4/E6 无明显变化,只有联结态 E4/E6 中 E、F 处理与 A 处理(常规耕作+常规播种)之间有显著差异。本试验表明除 A、C 处理外,其余各处理之间均差异显著,数值均高于 A 处理。

本试验结果表明,对于联结态腐殖质,各处理中以 A、C 处理含量最低,但与 D、F 无显著差异但都与 B、E 两个处理之间差异显著,添加秸秆鸡粪的处理要高于没添加的处理,这说明秸秆鸡粪的加入有利于联结态腐殖质的积累,这与刘小虎等^[17]的研究结果相同。联结态腐殖质胡敏酸和富

里酸没有明显的变化规律,而E4/E6整体变化幅度不大。这与李建明等^[3]第一年的研究结果中动植物残体要高于CK相似,Nicole Senesi等^[18]也证明了这一点。

由本试验结果还发现加入鸡粪秸秆和没施加的处理之间稳结态腐殖质无明显的规律性,再有地膜覆盖的四个处理中,C、E处理要显著优于D、F,这与滴灌的水浸作用有关。这表明扰动土壤不利于稳结态腐殖质的积累。这与Slepetiene A等^[9]研究旋耕秸秆还田有利于土壤腐殖质的积累不同。这可能由于耕作模式不同引起的。H/F和E4/E6均无明显变化规律。秸秆鸡粪的加入和覆膜等操作方式较常规耕作、常规播种能够增加土壤紧结态腐殖质的含量。这说明常规耕作不利于土壤紧结态腐殖质积累,进而土壤肥力下降。

4 结 论

本文研究了不同耕作模式下土壤腐殖质结合形态的变化,得到以下结论:

(1)不同耕作模式下土壤松结态腐殖质含量以F处理表现最好,胡敏酸、富里酸则变化不明显。E4/E6值含量较常规处理均有所增加。

(2)不同耕作模式对土壤联结态腐殖质影响很小,B、E处理表现最优,与其他处理间差异显著。胡敏酸含量以A、C、E处理表现最优,与其他处理之间差异显著。富里酸含量以B处理最高,较其他处理高了15.79%~94.73%。

(3)不同耕作模式下土壤稳结态腐殖质以C处理含量最高,胡敏酸腐殖质含量也是B、C处理最高,黑土稳结态腐殖质E4/E6值变化幅度很小。

(4)紧结态腐殖质以C处理含量最高,较其他处理分别高了82.84%、43.45%、50.83%、53.29%、56.08%。

参考文献:

- [1] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [2] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和粮食安全[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 385-393.
- [3] 李建明, 吴景贵, 王利辉. 不同有机物料对黑土腐殖质结合形态影响差异性的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(8): 1608-1615.
- [4] Thomas Kätterer, Martin Anders Bolinder, Olof Andrén, et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues as revealed by a long-term field experiment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 141(1-2): 184-192.
- [5] Felipe Bastida, Keiji Jindo, José Luis Moreno, et al. Effects of organic amendments on soil carbon fractions, enzyme activity and humu-enzyme complexes under semi-arid conditions[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012(53): 94-102.
- [6] 姜 岩, 吴景贵, 王明辉, 等. 非腐解有机物培肥对草甸黑土型水稻土腐殖质结合形态的影响[J]. *土壤通报*, 1998, 29(5): 203-205.
- [7] 秦纪洪, 王 琴, 孙 辉. 川西亚高山-高山土壤表层有机碳及活性组分沿海拔梯度的变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5858-5864.
- [8] 韩 宾, 徐尚起, 张海林, 等. 耕作方式对土壤腐殖质结合状态及组成的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2010, 15(1): 72-78.
- [9] Deike S, Pallutt B, Melander B, et al. Long-term productivity and environmental effects of arable farming as affected by crop rotation, soil tillage intensity and strategy of pesticide use: A case-study of two long-term field experiments in Germany and Denmark[J]. *Eur J Agron*, 2008, 29(4): 191-199.
- [10] Almendros G, Kgathi D, Sekhwela M, et al. Biogeochemical assessment of resilient humus formations from virgin and cultivated northern Botswana soils[J]. *J Agr Food Chem*, 2003, 51(15): 4321-4330.
- [11] Clark M S, Ferris H, Klonsky K, et al. Agronomic, economic, and environmental comparison of pest management in conventional and alternative tomato and corn systems in northern California[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1998, 68(1/2): 51-71.
- [12] Pimentel D, Hepperly P, Hanson J, et al. Environmental, energetic and economic comparisons of organic and conventional farming systems[J]. *Bio Science*, 2005, 55(7): 573-582.
- [13] 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.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 308-316.
- [15] Kumada K, Sato O, Ohsumi Y, et al. Humus composition of mountain soils in central Japan with special reference to the distribution of P type humic acid[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1967, 13(5): 151-158.
- [16] 史吉平, 张夫道, 林 葆. 长期定位施肥对土壤腐殖质结合形态的影响[J]. *土壤肥料*, 2002(6): 8-11.
- [17] 刘小虎, 贾庆宇, 安婷婷, 等. 不同施肥处理对棕壤腐殖酸组成和性质的影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 328-332.
- [18] Nicola Senesi, Cesar Plaza, Gennaro Brunetti, et al. A comparative survey of recent results on humic-like fractions in organic amendments and effects on native soil humic substances[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007(39): 1244-1262.
- [19] Slepetiene A, Slepetys J. Status of humus in soil under various long-term tillage systems[J]. *Geoderma*, 2005, 127(3-4): 207-215.

(责任编辑: 王海岩)