

秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质 及玉米产量的影响^{*}

范 围 吴景贵[†] 李建明 何瑞成 姚颜莹 王笃超 孙 玲 王
彩云

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘 要 为明确秸秆均匀还田在农业生产中推广应用的可行性, 以吉林省农安县正邦农场黑钙土为研究对象, 设置 CK (未施用秸秆)、EIS (秸秆均匀还田)、SM (秸秆覆盖还田)、SP (秸秆翻压还田) 共四种处理, 通过环刀法及土壤紧实度仪测量土壤容重及土壤紧实度, 湿筛法及干筛法测定土壤团聚体组成, 腐殖质组成修改法提取土壤胡敏酸及富里酸, 红外光谱法测定土壤胡敏酸结构特征, 并对玉米产量进行计算。结果表明: 秸秆还田有效降低了土壤容重及土壤紧实度, 增加了土壤有机碳含量, 有效促进了土壤腐殖质积累, 显著提高了玉米产量, 其效果在秸秆均匀还田处理中最为明显。与 CK 相比, EIS 处理显著降低了土壤容重及土壤紧实度, 降低幅度分别为 33.11%、24.3%; EIS 处理增加了土壤平均当量直径 (MWD)、水稳系数 (K) 及 >0.25 mm 团聚体组分含量, 增加幅度分别为 56.86%、33.69%及 16.21%; EIS 处理的土壤有机碳、腐殖质碳、胡敏酸碳和富里酸碳含量明显增加, 增加幅度分别为 27.8%、44.2%、63.3%及 33.8%。EIS 处理同时促进了秸秆的腐解与转化, 促使土壤胡敏酸结构氧化度和缩合度呈下降趋势, 脂族链烃和芳香碳含量增加, 土壤胡敏酸结构简单化、年轻化。该结果对于指导东北地区秸秆还田实践具有重要意义。

关键词 土壤容重; 土壤团聚体; 土壤有机碳; 土壤腐殖质; 秸秆均匀还田

中图分类号 S153 **文献标识码** A

随着世界粮食产量的不断增加, 作物残体成为一种不断增长、数量庞大的有机污染物^[1]。作物残体是指作物收获后仍残留在田地中的植株, 包括农作物的根、茎、叶以及其他部分^[2]。目前, 全球作物残体年均总产量约为 74 Tg, 其中, 小麦与水稻残体总产量约为 45 Tg^[3]。2014 年, 中国的作物残体总产量达到了 8.5 Tg, 近十年的年平均作物残体总产量也达到了 7 Tg^[4]。

随着作物残体数量的不断增加, 由此而产生的环境问题也日益严峻, 作物残体的安全利用与处理已经成为人类社会所面临的重要问题^[5]。广泛的研究表明, 作物残体是土壤养分的重要来源, 它可以直接影响土壤的生物、物理和化学性质^[6-7]。在土壤中施用作物残体可以有效增加土壤的矿质态氮、全氮以及有机碳含量^[8-9]。在土壤中施用作物残体不仅可以促进耕作、减少土壤侵蚀、增加土壤微生物群落多样性, 还可以起到防止土壤养分经淋洗而流失的作用^[10]。究其原因, 主要是因为当作物残体施入土壤后, 增加了土壤有机质含量, 减少了土壤侵蚀现象的发生^[11]。

目前在东北地区, 秸秆的主要还田方式有两种, 分别是秸秆翻压还田及秸秆覆盖还田。但传统

^{*} 国家重点研发计划项目(2017YFD0201801)和吉林省科技厅重大科技招标专项(20150203004NY)共同资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2017YFD0201801) and the Research Foundation of the Science & Technology Agency of Jilin Province, China (No. 20150203004NY)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wujingguiok@163.com

作者简介: 范 围 (1993—), 男, 吉林舒兰人, 硕士研究生, 研究方向为农业废弃物及资源化利用。E-mail: fanwe1@qq.com

收稿日期: 2017-09-26; 收到修改稿日期: 2017-11-14; 优先数字出版日期 (www.cnki.net):

的秸秆还田方式通常存在秸秆不易腐解、影响出苗及不利耕作等缺点。因此,一种新型的秸秆还田方式——秸秆均匀还田技术应运而生。秸秆均匀还田是指通过粉垄耕作,将粉碎至 1~2 cm 的作物残体与土壤均匀混合,使其均匀分布至 0~70 cm 的土层中。不同于传统的旋耕、翻耕、犁翻耕等耕作方式,粉垄耕作是一种全新的耕作方式,其原理是利用专用机械垂直螺旋型钻头,按照作物种植需求将土壤旋磨粉碎并自然悬浮呈垄,其粉碎深度最深可达 70~100 cm,粉垄耕作面上种植相应作物;因该耕作方式将土壤旋磨粉碎且自然呈垄,将其命名为粉垄^[12]。与传统的耕作方式相比,粉垄耕作能打破耕作土壤犁底层,有效降低土壤容重,并能提高土壤的透气性与蓄水保水能力,对土壤物理性质具有非常明显的改善作用^[13-18];并且可在确保改善土壤物理性质与提高作物产量的同时,使作物残体在土壤中均匀分布,这有利于加快作物残体的腐解。

国内外学者对秸秆还田做了一系列研究:孙元宏等^[19]研究表明,秸秆还田促进了土壤中小粒径团聚体(<0.25 mm)向大团聚体(>0.25 mm)转化,大团聚体含量相比不施秸秆增加了 10 倍左右,同时,秸秆还田也有效促进了耕层土壤大团聚体中有机碳的积累,其增加幅度为 69.90%。Kabiri 等^[20]的研究结果显示,深耕加强了土壤中碳和氮与大粒径土壤团聚体的结合能力,减弱了碳和氮与小粒径团聚体的结合能力。彭义等^[21]研究表明,秸秆覆盖有利于有机碳在表层的累积,与无秸秆覆盖土壤相比,具有更高的氨基化合物、脂肪族碳和芳香族碳含量。然而,目前对于秸秆均匀还田的研究仍然较少。因此,本文通过在东北农业主产区进行长期定位试验,研究了秸秆均匀还田对土壤理化性质的影响,并对比了不同秸秆还田方式对土壤理化性质及作物产量的影响,以期合理确定适合东北地区的最佳秸秆还田方式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点选在吉林省长春市农安县正邦农场(44°26' N, 125°21' E)。试验区地势平坦,属于温带大陆性季风气候,受季风的强烈影响,冬春寒冷干燥,夏季温暖多雨,干湿季节更替明显。多年平均气温为 9.8℃,1 月份最冷,平均气温为-12.5℃,7 月份最热,平均气温为 22.3℃;无霜期平均 145 d,≥10℃积温达 2 800℃。降水年际和年内分布极不均匀,年平均降水量 331.9 mm,主要集中在 6 至 9 月份。土壤类型为草甸黑钙土,其 CaCO₃ 淀积部位较高,多见于 50 cm 土层内,并含有少量可溶性钠盐,土壤呈微碱性,相当于美国系统分类下的钙积冷凉软土(Calciboroll)。其基本理化性质如下:土壤全氮 1.26 g kg⁻¹;碱解氮 103.5 mg kg⁻¹;有效磷 19.3 mg kg⁻¹;速效钾 127.0 mg kg⁻¹;土壤有机质 12.73 g kg⁻¹;平均 pH 7.75。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理,分别为(1)对照(CK):未施用秸秆,仅进行正常的耕作;(2)秸秆均匀还田(EIS):将粉碎至 1~2 cm 的秸秆通过粉垄耕作的方式使其在 0~20 cm 土层与土壤充分混匀;(3)秸秆覆盖还田(SM):播前对土地翻耕,人工播种后将秸秆顺着行间均匀覆盖;(4)秸秆翻压还田(SP):将粉碎至 10 cm 的秸秆通过机械翻压的方式使其在 0~20 cm 土层与土壤充分混匀。每个小区长 10 m,宽 5 m,面积为 50 m²,随机排列,3 个重复。各小区秸秆还田量均相同,年施用量为 7 500 kg hm⁻²。还田秸秆的养分含量为:有机碳 399.0 g kg⁻¹,全氮 6.7 g kg⁻¹,C/N 59.55:1。各小区均施等量底肥,年施用量为氮肥 165 kg hm⁻² (以 N 计)、磷肥 82.5 kg hm⁻² (以 P₂O₅ 计)、钾肥 82.5 kg hm⁻² (以 K₂O 计)。每年种植玉米,品种为吉农大 988 (吉林农大科贸种业有限责任公司),4 月末播种,10 月初秋收。各小区全程雨养,无补充灌溉;小区除草主要为人工除草。于

2016年10月对不同处理各小区进行0~20 cm土壤样品采集及样品分析测定。

1.3 分析方法

土壤容重采用环刀法进行测量；土壤紧实度采用土壤紧实度仪（TJSD-750型，浙江托普仪器有限公司）测定；土壤有机碳（Soil organic carbon, SOC）采用重铬酸钾外加热法测定；碱解氮测定采用碱解扩散法；有效磷测定采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法；速效钾测定采用火焰光度计法；pH采用电位法测定^[22]。

土壤腐殖质组成提取测定采用腐殖质组成修改法^[23]进行提取：以 $0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 + 0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{NaOH}$ 混合液为提取剂从土壤中提取腐殖酸（Humus extracted, HE），用 $0.5 \text{ mol L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$ 分离腐殖酸（HE）得到胡敏酸（HA）与富里酸（FA），剩余为胡敏素（HM）。各组分含碳量采用重铬酸钾容量法测定。

HA样品提取纯化：采用国际腐殖质协会（International Humic Substances Society, IHSS）推荐的方法^[24]，将风干土样用 $0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{HCl}$ 调至土水比1:10，用 $0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{NaOH}$ 溶液提取得到HE，将HE提取液经 $6 \text{ mol L}^{-1} \text{HCl}$ 酸化至pH=1.0得到粗HA，经高速离心、电渗析、旋转蒸发和冻干后得到纯化后的HA样品。

HA红外光谱通过傅里叶变换红外光谱仪（AVATAR360，美国）测定，采用KBr压片法，测试范围为 $500 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ ，通过OMNIC软件对红外谱图进行特征峰选取和半定量分析，对不同波数的特征吸收峰进行峰面积计算，用某一峰面积占各峰总面积的百分比表示其峰强度。

土壤团聚体组成测定分别采用了干筛法和湿筛法^[25]。干筛时，称取风干土样约500 g，用孔径为5、3、2、1、0.5、0.25 mm的套筛，在电动振筛分机（8411型，浙江省上虞市道墟五四仪器厂）上以 30次 min^{-1} 的速度筛分5 min，将留在各级筛子上的团聚体称重，计算各级团聚体占土样总量的百分含量。然后按其百分比，配成2份质量为50 g的土样，作湿筛分析用。湿筛时，先将团聚体充分润湿5 min，再用孔径为5、2、1、0.5、0.25 mm的套筛，在土壤团聚体分析仪（TTF-100型，浙江省上虞市舜龙实验器厂）上以 30次 min^{-1} 的速度筛分6 min（振幅4 cm）。湿筛结束后将留在各级筛孔上的团聚体用水洗入铝盒中，烘干后称重，计算水稳性团聚体组成。

1.4 土壤团聚体平均当量直径及水稳系数计算

土壤团聚体平均当量直径（MWD）的计算公式为：

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n B_i W_i \quad (1)$$

式中， B_i 为筛分出来的任一大小范围团聚体的平均直径，mm； W_i 为任一大小范围团聚体的相应质量占土壤样品干质量的分数。

土壤团聚体水稳系数的计算公式为：

$$K = \frac{A}{M} \times 100 \quad (2)$$

式中， K 为水稳系数，%； A 为 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳定性团聚体总量，g； M 为 $>0.25 \text{ mm}$ 机械稳定性团聚体总量，g。

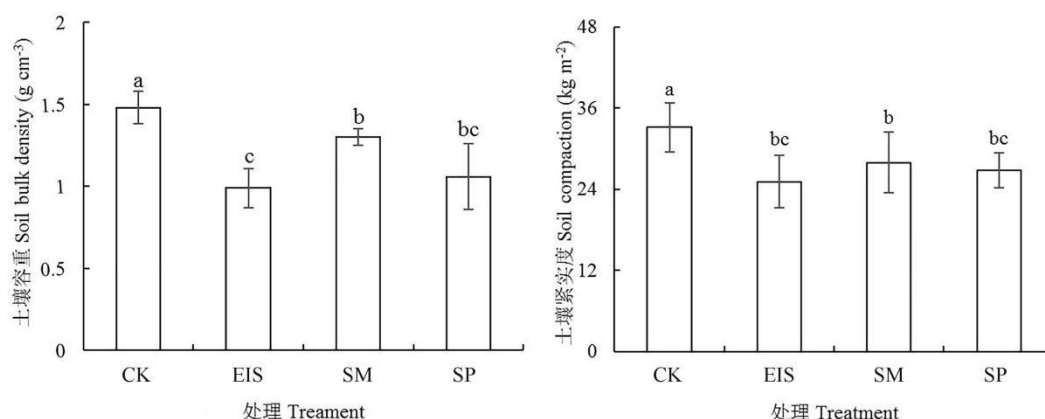
1.5 数据处理

数据经Excel 2016处理后，采用SPSS 22.0统计软件进行统计分析，采用邓肯（Duncan）新复极差法进行5%水平的差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 不同秸秆还田方式对土壤容重及土壤紧实度的影响

土壤容重及土壤紧实度是衡量土壤松紧状况的重要指标,其直接影响土壤的通气性及作物根系的生长发育。过松的土壤不利于作物根系生长,易跑风漏墒,土壤养分也易随降雨或灌水而流失。而过紧的土壤,通气透水性差,容易造成地面积水及地表径流,并且对土壤微生物活动及养分转化均会产生不利影响。本研究结果表明,秸秆还田有效降低了耕层土壤容重,但各秸秆还田处理间变化却不尽相同。由图 1 可见,与 CK 相比,EIS 与 SP 显著降低了土壤容重,降低幅度分别为 33.11%、28.37%,而 SM 对土壤容重影响较小,仅较对照处理降低 12.16%。不同秸秆还田方式对土壤紧实度影响与土壤容重大致趋同。在不同秸秆还田处理间,EIS 处理变化幅度最大,其降低幅度相对于 SM 及 SP,分别降低 10.2%与 6.4%。该结果与 Kabiri 等^[20]的研究结果相似。秸秆具有密度低的特点,在未完全分解状态下对土壤会起到物理性疏松作用,从而降低单位体积内土壤质量。而秸秆均匀还田相较于其他两种秸秆还田处理,对土壤容重及土壤紧实度的显著改善,则可能是由于秸秆均匀还田通过粉垄耕作方式,有效打破了土壤犁底层,疏松了土壤。并且其使秸秆与土壤充分接触,有效促进了秸秆对土壤物理性质的改善。



注: CK、EIS、SM、SP 分别代表对照、秸秆均匀还田、秸秆覆盖还田、秸秆翻压还田,不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。下同 Note: The letters CK, EIS, SM and SP stands for control, even incorporation of straw, return of straw as mulch and straw plowed down into the soil. Different letters represent significant difference ($p < 0.05$). The same below

图 1 不同秸秆还田处理的土壤容重与土壤紧实度

Fig. 1 Soil bulk density and soil compactness relative to treatment

2.2 不同秸秆还田方式对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土壤结构的好坏主要受土壤团聚体数量、稳定性及形态的影响,而水稳性团聚体的数量和分布状况更是直观反映了土壤的结构保水性、稳定性及抗侵蚀能力。其中 0.25~5 mm 团聚体是土壤中较为理想的大团聚体,它的通气性、保肥性、保温性、机械弹性和水稳性均优,其含量越高,表示土壤的结构越好。由表 1 可见,秸秆还田处理均能有效增加 >1 mm 水稳性团聚体含量,其中 EIS 处理增加幅度较高。EIS 较 CK 及 SP 和 SM 处理提高了 >0.25 mm 团聚体的数量,其增加幅度分别为 16.71%、13.18%和 24.29%。这表明,秸秆均匀还田能促进土壤中水稳性小团聚体向较大的水稳性大团聚体转化,这主要与土壤中有有机质含量增加有关。有研究发现,黑土大团聚体主要胶结物质是有机质;直径 1~10 mm 的水稳性团聚体通常适于作物的生长,因为这种团聚体有利于土壤自动调节通气与持水的矛盾、养分释放与保持的矛盾^[26]。同时,EIS 处理中 >5 mm 及 2~5 mm 水稳性

团聚体含量均高于 SP 及 SM 处理, 且达到显著水平。说明与其他秸秆还田方式相比, 秸秆均匀还田更能有效增加土壤中 $>2\text{ mm}$ 的水稳性团聚体含量, 使土壤结构得以改善。

表 1 不同秸秆还田处理土壤团聚体组成、平均当量直径(MWD)及水稳系数(K)

Table 1 Soil aggregates composition, mean weight diameter (MWD) and water stability coefficient (K) relative to treatment

处理 Treatment	测定方法 Determined method	不同粒径土壤团聚体 Composition of soil aggregates (mm)						MWD (mm)	K(%)
		>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.2 5 mm	<0.25 mm		
CK	干筛法	0.145±	0.289±	0.163±	0.291±	0.041±	0.022±		
	Dry-sieving	0.026c	0.053a	0.005a	0.051a	0.005c	0.005d	0.355±	34.46±
	湿筛法	0.006±	0.007±	0.005±	0.054±	0.265±	0.663±	0.011d	0.19d
	Wet-sieving	0.001c	0.002b	0.001b	0.005b	0.021a	0.012a		
EIS	干筛法	0.249±	0.294±	0.126±	0.198±	0.057±	0.045±		
	Dry-sieving	0.027b	0.026a	0.009b	0.012b	0.005b	0.006c	0.640±	46.07±
	湿筛法	0.037±	0.031±	0.031±	0.086±	0.225±	0.560±	0.013a	0.43a
	Wet-sieving	0.005a	0.011a	0.008a	0.013a	0.019b	0.021c		
SM	干筛法	0.304±	0.271±	0.110±	0.179±	0.057±	0.078±		
	Dry-sieving	0.016a	0.008a	0.015b	0.014b	0.008b	0.008b	0.522±	38.39±
	湿筛法	0.029±	0.012±	0.033±	0.055±	0.225±	0.646±	0.009c	0.58c
	Wet-sieving	0.001b	0.002b	0.002a	0.006b	0.014b	0.026ab		
SP	干筛法	0.215±	0.255±	0.116±	0.232±	0.078±	0.104±		
	Dry-sieving	0.018b	0.024a	0.011b	0.021b	0.006a	0.012a	0.574±	42.63±
	湿筛法	0.026±	0.033±	0.032±	0.075±	0.216±	0.618±	0.013b	0.33b
	Wet-sieving	0.004b	0.006a	0.008a	0.010a	0.021b	0.027b		

注: 表中不同小写字母表示不同处理间的差异显著 ($p<0.05$)。下同 Note: Different letters represent significant difference in different treatments ($p<0.05$). The same below

团聚体的水稳定性一般用平均当量直径(MWD)及水稳系数(K)来表示, 水稳定性团聚体的百分比越高, MWD 越大; 团聚体越稳定, K 值越大^[27]。由表 1 可以看出, 各秸秆还田处理土壤 MWD 及 K 值均高于 CK, 表现为 $EIS>SP>SM>CK$; 对于 MWD, 各处理较 CK 增幅分别为 80.28%、61.69%和 47.04%; 对于 K 值, 各处理较 CK 增幅分别为 33.69%、23.71%和 11.40%。这说明秸秆还田对于培肥土壤、提高土壤团聚体水稳定性具有较好的作用。产生这一结果是由于秸秆还田后分解产生如多糖、蛋白质等有机质, 以及由于土壤中微生物活性提高而形成腐殖物, 这些重要的有机胶结质对大团聚体的形成及稳定性产生了积极影响^[28]。Jastrow^[29]认为植物残体输入土壤能促进真菌菌丝体生长, 微生物的分泌液将土壤微团聚体、土壤矿物质和粗颗粒有机物胶结为大团聚体。而添加秸秆速腐剂可以加快秸秆的分解速率, 促进大团聚体的形成^[30]。本研究中以 EIS 处理效果最好, 其 MWD 及 K 值较 SP 处理增加幅度为 11.50%与 8.07%。这可能是由于粉垄耕作方式相比于传统秸秆翻压还田更有效地促进了玉米秸秆与土壤的充分接触, 增加了土壤与玉米秸秆的接触面积, 起到了促进腐解的作用, 有效促进了土壤大团聚体 ($>0.25\text{ mm}$) 的形成。而 SM 处理较低的土壤 MWD、K 值及 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体数量则有可能是由于覆盖秸秆难以与土壤充分接触, 难以达到玉米秸秆腐

解产物直接快速作用于土壤的目的。

2.3 不同秸秆还田方式对土壤有机碳含量的影响

黑钙土作为一种黏粒含量较低、对土壤有机质保护能力较弱的轻质土壤,其有机质矿化速率受人为扰动的影响较大。不同秸秆还田方式对黑钙土有机碳的影响如图2所示,各处理有机碳含量表现为EIS>SM>SP>CK。与CK相比,EIS、SP与SM处理下表层土壤有机碳含量分别增加了27.8%、15.9%与7.5%。说明秸秆还田有利于提高土壤有机碳含量,促进土壤有机质积累。Thomsen和Christensen^[31]的研究同样表明,秸秆还田使土壤有机碳源的输入增加。Liu等^[11]的研究表明,将秸秆混入土层并使其与土壤颗粒充分接触,作物秸秆更易腐解转化为土壤有机碳组分,有利于土壤团聚体生成,增加土壤对有机碳的固持效果。土壤有机碳的积累同样与作物根系的生长有密切的关系。张丽等^[32]的研究表明,深松耕作促使玉米根系在土壤0~20 cm土层的分布相对减少,较多根系向下伸长生长,20 cm土层以下根干重、根长密度、根表面积密度和根体积密度均有所增加。而作物根系分布特性的改变,促使了有机质积累特性的变化。秸秆均匀还田处理条件下较高的有机碳含量则说明,秸秆均匀还田通过粉垄耕作技术,有效促进了秸秆与土壤的紧密接触,促进了作物根系生长,激发了土壤微生物活性,因此,相较于其他秸秆还田方式,秸秆均匀还田更有利于土壤有机碳积累。

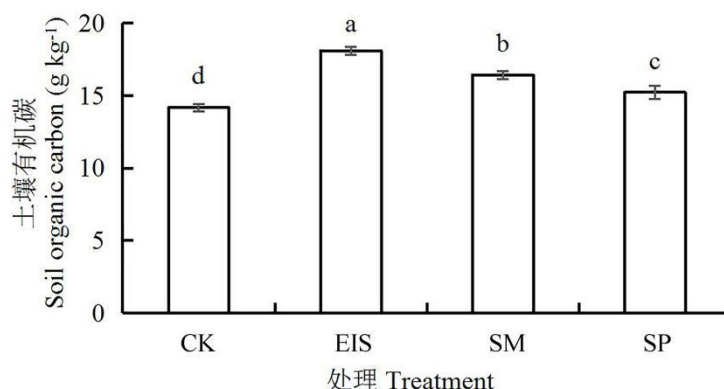


图2 不同秸秆还田处理的土壤有机碳含量

Fig. 2 Soil organic carbon content relative to treatment

2.4 不同秸秆还田方式对土壤腐殖质组成的影响

各处理土壤腐殖质组分有机碳含量如表2所示,秸秆还田处理显著增加了土壤腐殖质各组分含量,但各秸秆还田处理间变化却不尽相同。与CK相比,EIS显著增加了土壤腐殖物质(HEC)、土壤胡敏酸碳(HAC)和富里酸碳(FAC)含量,增加幅度分别为47.6%、63.3%与33.8%。对于不同秸秆还田处理,EIS较SP的增加幅度最为显著,其较SP的HEC、HAC与FAC含量的增加幅度分别为28.2%、26.3%与30.4%。对于SM处理,EIS对其HEC、HAC与FAC含量的增加幅度则分别为8.2%、12.1%与4.3%。这一结果说明秸秆还田有利于土壤腐殖质组分改善,而秸秆均匀还田方式对土壤腐殖质积累效果最好。该结果与邹洪涛等^[33]的研究结果相似。这可能是由于秸秆还田后被土壤微生物矿化分解,促进了土壤腐殖质的形成。相比于传统犁翻耕作方式,秸秆均匀还田使秸秆与土壤充分混合,有利于土壤微生物活性的增强,因此,相较于其他处理显著促进了玉米秸秆矿化分解和土壤腐殖质的形成。

胡敏酸碳与富里酸碳的比值(HAC/FAC)是反映土壤有机质腐殖化程度的重要指标。从表2可以看出,秸秆还田处理增加了土壤HAC/FAC,但是与CK相比,SM处理下土壤HAC/FAC值略有增加,但变化并不显著;而EIS与SP处理下土壤HAC/FAC值从0.88分别增加至1.10与1.07,增加幅度分别为25%与21.6%。张晋京和窦森^[34]的研究结果表明,秸秆分解期间土壤腐殖质各组分含量增加,土壤腐殖质得到更新,活性增强。因此,随着玉米秸秆矿化分解及土壤有机质的形成,土

壤胡敏酸在腐殖物质中所占比例显著提高, EIS 与 SP 对土壤 HAC/FAC 的影响最为显著。

表 2 不同秸秆还田处理土壤腐殖质组成

Table 2 Soil humus composition relative to treatment

处理 Treatments	腐殖质碳 Humus substances carbon (g kg ⁻¹)	胡敏酸碳 Humic acid carbon (g kg ⁻¹)	富里酸碳 Fulvic acid carbon (g kg ⁻¹)	胡敏酸碳/富里酸碳 HAC/FAC
CK	7.17±0.07e	3.35±0.09e	3.82±0.07c	0.88±0.03c
EIS	10.58±0.09a	5.47±0.05a	5.11±0.03a	1.10±0.05ab
SM	9.78±0.08b	4.88±0.16b	4.90±0.12b	0.99±0.11ab
SP	8.25±0.16d	4.33±0.08d	3.92±0.11c	1.07±0.08a

土壤腐殖质色调系数 $\Delta \log K$ 是衡量腐殖物质结构复杂程度的一个重要指标。 $\Delta \log K$ 值越大, 土壤腐殖质结构越简单; $\Delta \log K$ 值越小, 则腐殖质结构越复杂。各处理土壤胡敏酸与富里酸的 $\Delta \log K$ 值如图 3 所示, 相比于 CK 处理, EIS、SM 与 SP 等秸秆还田处理均增加了土壤富里酸的 $\Delta \log K$, 其增加幅度分别为 12.4%、16.1%与 21.7%; 对于土壤胡敏酸, 仅有 EIS 处理略有增加, 增加幅度为 8.7%, 而 SM 与 SP 处理则分别下降了 7.7%、15.7%。因此, 相比于 CK 及其他处理, 秸秆均匀还田促使土壤胡敏酸及富里酸分子结构简单化。产生这一结果的原因可能是秸秆均匀还田有效促进了玉米秸秆的腐解与转化, 使其被微生物分解转化为新的且结构较为简单的土壤腐殖质。

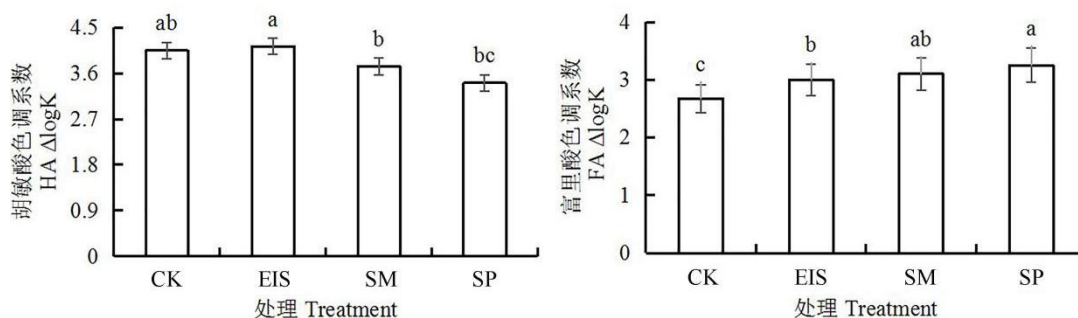


图 3 不同秸秆还田处理的土壤腐殖质各组分散色调系数

Fig. 3 $\Delta \log K$ values of soil humus relative to treatment

2.5 不同秸秆还田方式对土壤胡敏酸红外光谱的影响

不同秸秆还田方式下土壤 HA 的傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 变化如图 4 所示。腐殖物质红外光谱主要吸收峰的峰位及其归属^[35]为: 2 920 cm^{-1} 处代表不对称脂族 C-H 伸缩振动的峰, 2 850 cm^{-1} 处代表-CH₂-对称脂族 C-H 伸缩振动的峰, 1 720 cm^{-1} 处代表羧基 C=O 伸缩振动的吸收峰, 1 620 cm^{-1} 处代表芳香 C=C 伸缩振动的吸收峰, 1 454 cm^{-1} 为脂族 C-H 变形振动, 1 230 cm^{-1} 为酰胺、羧基中-OH 的变形振动和 C-O 伸缩振动, 1 035 cm^{-1} 为多糖或类多糖物质的 C-O 伸缩与硅氧化合物的 Si-O 伸缩振动。并用 2 920/1 720 和 2 920/1 620 特征比值来反映腐殖质分子的脂族链烃碳/羧基碳和脂族链烃碳/芳香碳的比值。

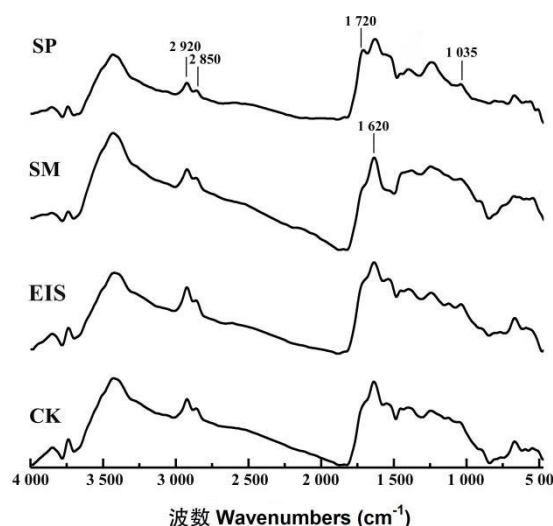


图 4 不同秸秆还田处理土壤中胡敏酸的傅里叶变换红外光谱

Fig. 4 Fourier transform infrared spectroscopy spectra (FTIR) of soil HA relative to treatment

由图 4 可见, 不同秸秆还田方式土壤 HA 的红外光谱特征基本相似, 但各处理特征峰吸收强度上有不同程度的差异, 反映了不同秸秆还田方式能够引起黑钙土壤 HA 的结构单元和官能团数量上的差异。对土壤 HA 主要吸收峰相对强度的半定量分析 (表 3) 结果表明, EIS 处理 HA 在 2 920 cm^{-1} 、2 850 cm^{-1} 吸收峰的相对强度均高于 CK、SP 及 SM, 1 620 cm^{-1} 和 1 720 cm^{-1} 吸收峰的相对强度小于 CK, 这说明秸秆均匀还田使 HA 脂肪链烃含量增加, 芳香碳及羧基含量降低。相应地, 其在 2 920/1 720 和 2 920/1 620 处比值均高于 CK、SP 及 SM, 说明秸秆均匀还田使土壤 HA 脂族性增强。对于其他处理, SP 处理在 1 620 cm^{-1} 处较 CK 及 EIS 增幅较大, 且 2 920/1 620 特征比值最小, 这说明秸秆翻压还田相比其他秸秆还田方式对 HA 芳香碳含量增幅较大; SM 处理在 2 920 cm^{-1} 、2 850 cm^{-1} 和 1 620 cm^{-1} 吸收峰的相对强度均低于 CK, 1 720 cm^{-1} 吸收峰的相对强度大于 CK, 说明 HA 脂肪链烃与芳香碳含量减少, 羧基含量增加。

表 3 不同秸秆还田方式对土壤胡敏酸的傅里叶变换红外光谱主要吸收峰相对强度的影响

Table 3 Relative intensity of the main absorption peaks in FTIR spectra of soil humic acid relative to treatment

处理 Treatments	相对强度 Relative intensity (%)				比值 Ratio	
	2 920 cm^{-1}	2 850 cm^{-1}	1 720 cm^{-1}	1 620 cm^{-1}	2 920/1 720	2 920/1 620
CK	1.231	0.294	1.389	2.324	0.886	0.529
EIS	1.698	0.352	1.308	2.034	1.298	0.835
SM	0.874	0.217	2.304	1.621	0.379	0.539
SP	1.246	0.332	1.065	3.326	1.169	0.375

Lynch 等^[36]通过 ^{13}C NMR 对比分析作物秸秆和动物粪便堆肥后土壤胡敏酸结构特征, 结果表明, 作物秸秆堆肥下胡敏酸中碳水化合物低于其他处理, 其脂肪族含量最高, 脂族性最强。而 Brunetti 等^[37]认为施用有机肥后土壤 HA 结构缩合度下降, 脂族性增强, 芳香性减弱, HA 结构趋于脂族化。本文得出类似结论可能是因为: 表层土壤由于受作物根系及传统犁翻耕作的影响, 土壤透气性、透水性和微生物活性均高于亚表层土壤^[38]; 而秸秆均匀还田在使秸秆与表层土壤充分接触的基础上, 加深了对亚表层土壤的扰动作用, 改变了气体扩散及团聚体结构, 充足的氧气及与土壤充分接触的秸秆刺激了微生物分泌和土壤酶活性的提高, 较多的 HA 结构被分解, 同时随着秸秆腐解, 土壤中新生成了大量结构较为简单、脂族性强的 HA 分子, 从而促进了土壤中腐殖质的更新与活化^[39]。

2.6 不同秸秆还田方式对玉米产量的影响

由图 5 可以看出, 秸秆还田处理相比于不还田处理显著促进了玉米产量增长, 但不同秸秆还田方式下玉米产量的变化却不尽相同。相比于 CK, EIS 与 SM 显著增加了单位面积玉米产量, 其增加幅度为 44.9%与 39.9%; 而 SP 增长幅度较小, 为 7.7%。

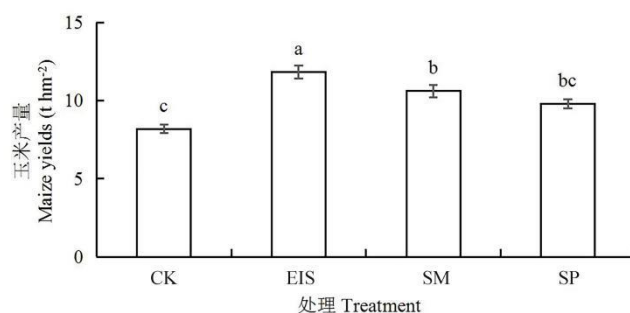


图 5 不同秸秆还田处理条件下的玉米产量

Fig. 5 Yield of maize relative to treatment

作物产量是衡量肥料施用效果及土地生产能力的重要参数, 而作物产量又随着不同外界因素的影响而产生变化。由表 4 不同秸秆还田方式玉米产量与土壤理化性质的相关性分析可见, 产量与土壤容重及土壤紧实度的相关系数为-0.780 及-0.917, 呈现极显著负相关, 说明降低土壤容重及土壤紧实度可以有效促进作物产量的提升。而玉米产量与土壤有机碳含量以及 HAC/FAC 的相关系数为 0.981 与 0.834, 均呈极显著正相关, 说明土壤有机碳及土壤腐殖质组分的增加可以有效促进玉米产量的增加。因此, 秸秆均匀还田相比于其他处理, 通过粉垄耕作的方式有效降低了土壤容重及紧实度, 又通过促使秸秆与土壤紧密接触, 有效促进了土壤有机碳及腐殖物质的积累, 从而有效提高了玉米产量。

表 4 不同秸秆还田处理玉米产量与土壤理化性质的相关性

Table 4 Correlation analysis of maize yield and soil physic-chemical properties relative to treatment

土壤容重	土壤紧实度	土壤有机碳	胡敏酸碳/富里酸碳
Soil bulk density	Soil compaction	Soil organic carbon	HAC/FAC
-0.780**	-0.917**	0.981**	0.834**

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

3 结论

与 CK 相比, 秸秆均匀还田有效降低了土壤容重及土壤紧实度, 提高了土壤团聚体水稳定性及 >0.25 mm 土壤团聚体含量, 改善了土壤结构, 增加了土壤有机碳含量, 有效促进了土壤腐殖质积

累, 并显著提高了玉米产量。相比于秸秆翻压还田及秸秆覆盖还田, 秸秆均匀还田处理效果最为明显, 其显著促进了作物秸秆的分解与转化, 使土壤胡敏酸及富里酸分子结构简单化。秸秆还田后 HA 结构氧化度和缩合度呈下降趋势, 脂族链烃和芳香碳含量增加, HA 结构简单化、年轻化, 而秸秆均匀还田则对土壤 HA 结构及特征变化影响更显著。综上所述, 秸秆均匀还田对于改善土壤结构, 提高土壤肥力具有非常重要的作用, 是一种较为适合在东北地区推广的秸秆还田模式。

参考文献

- [1] Schnitzer M, Monreal C M, Powell E E. Wheat straw biomass: A resource for high-value chemicals. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2014, 49(1): 51-67
- [2] Lim J S, Manan Z A, Alwi S R W, et al. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3084-3094
- [3] Kim S, Dale B E. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 26(4): 361-375
- [4] Jiang D, Zhuang D, Fu J, et al. Bioenergy potential from crop residues in China: Availability and distribution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(3): 1377-1382
- [5] Li X, Muponda E, Panigrahi S, et al. A review of agricultural crop residue supply in Canada for cellulosic ethanol production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 2954-2965
- [6] Turmel M, Speratti A, Baudron F, et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis. *Agricultural Systems*, 2015, 134: 6-16
- [7] Huang S, Zeng Y, Wu J, et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 2013, 154: 188-194
- [8] Guenet B, Juarez S, Bardoux G, et al. Evidence that stable C is as vulnerable to priming effect as is more labile C in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 52: 43-48
- [9] Cely P, Gascó G, Paz-Ferreiro J, et al. Agronomic properties of biochars from different manure wastes. *Journal of Analytical & Applied Pyrolysis*, 2015, 111: 173-182
- [10] Cao Y, Yang B, Song Z, et al. Wheat straw biochar amendments on the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 130: 248-255
- [11] Liu S, Yan C, He W, et al. Effects of different tillage practices on soil water-stable aggregation and organic carbon distribution in dryland farming in Northern China. *Acta Ecologica Sinica (International Journal)*, 2015, 35(4): 65-69
- [12] Wei B H. Yield increasing and quality improving effects of smash-ridging method ("4453" Effects) and its potential in benefiting the nation and the people. *Agricultural Science & Technology*, 2014, 15(10): 1767-1769
- [13] Villamil M B, Little J, Nafziger E D. Corn residue, tillage, and nitrogen rate effects on soil properties. *Soil & Tillage Research*, 2015, 151: 61-66
- [14] Crittenden S J, Poot N, Heinen M, et al. Soil physical quality in contrasting tillage systems in organic and conventional farming. *Soil & Tillage Research*, 2015, 154: 136-144
- [15] Andruschkewitsch R, Koch H J, Ludwig B. Effect of long-term tillage treatments on the temporal dynamics of water-stable aggregates and on macro-aggregate turnover at three German sites. *Geoderma*, 2014, s217/218(3): 57-64
- [16] Cai H, Ma W, Zhang X, et al. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize. *The Crop Journal*, 2014, 2(5): 297-307
- [17] Linh T B, Sleutel S, Thi G V, et al. Deeper tillage and root growth in annual rice-upland cropping systems result in improved rice yield and economic profit relative to rice monoculture. *Soil & Tillage Research*, 2015, 154: 44-52

- [18] Meena J R, Behera U K, Chakraborty D, et al. Tillage and residue management effect on soil properties, crop performance and energy relations in greengram (*Vigna radiata* L.) under maize-based cropping systems. *International Soil & Water Conservation Research*, 2015, 3(4): 261-272
- [19] 孙元宏, 高雪莹, 赵兴敏, 等. 添加玉米秸秆对白浆土重组有机碳及团聚体组成的影响. *土壤学报*, 2017, 54(4): 1009-1017
- Sun Y H, Gao X Y, Zhao X M, et al. Effects of corn stalk incorporation on organic carbon of heavy fraction and composition of soil aggregates in albic soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(4): 1009-1017
- [20] Kabiri V, Raiesi F, Ghazavi M A. Six years of different tillage systems affected aggregate-associated SOM in a semi-arid loam soil from Central Iran. *Soil & Tillage Research*, 2015, 154: 114-125
- [21] 彭义, 解宏图, 李军, 等. 免耕条件下不同秸秆覆盖量的土壤有机碳红外光谱特征. *中国农业科学*, 2013, 46(11): 2257-2264
- Peng Y, Xie H T, Li J, et al. Effect of no-tillage with different stalk mulching on soil organic carbon and mid-infrared spectral characteristics (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(11): 2257-2264
- [22] 劳家桢. *土壤农化分析手册*. 北京: 农业出版社, 1988
- Lao J S. *Analytical handbook of soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1988
- [23] 窦森. *土壤有机质*. 北京: 科学出版社, 2010
- Don S. *Soil organic matter* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [24] Kuwatsuka S, Watanabe A, Itoh K, et al. Comparison of two methods of preparation of humic and fulvic acids, IHSS method and NAGOYA method. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1992, 38(1): 23-30
- [25] 石宗琳, 王加旭, 梁化学, 等. 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究. *土壤学报*, 2017, 54(2): 387-399
- Shi Z L, Wang J X, Liang H X, et al. Status and evolution of soil aggregates in apple orchards different in age in Weibei (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 387-399
- [26] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregate in soil. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163
- [27] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. *Biosystem Engineering*, 2005, 90(2): 227-234
- [28] Sodhi G P S, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(2): 412-418
- [29] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665-676
- [30] 胡诚, 陈云峰, 乔艳, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 59-66
- Hu C, Chen Y F, Qiao Y, et al. Effect of returning straw added with straw-decomposing inoculants on soil melioration in low-yielding yellow clayey soil (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1): 59-66
- [31] Thomsen I K, Christensen B T. Yields of wheat and soil carbon and nitrogen contents following long-term incorporation of barley straw and ryegrass catch crops. *Soil Use and Management*, 2004, 20(4): 432-438
- [32] 张丽, 张中东, 郭正宇, 等. 深松耕作和秸秆还田对农田土壤物理特性的影响. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 102-106
- Zhang L, Zhang Z D, Guo Z Y, et al. Effect of subsoiling tillage and straw returning to field on soil physical properties (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 102-106

- [33] 邹洪涛, 关松, 凌尧, 等. 秸秆还田不同年限对土壤腐殖质组分的影响. 土壤通报, 2013, 44(6):1398-1402
Zou H T, Guan S, Ling Y, et al. Effect of different straw return years on humus composition of soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(6): 1398-1402
- [34] 张晋京, 窦森. 玉米秸秆分解期间胡敏酸、富里酸动态变化的研究. 土壤通报, 2005, 36(1):134-136
Zhang J J, Dou S. Dynamic change of humic and fulvic acid during corn stalk decomposition (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1):134-136
- [35] 郑殷恬, 赵红, 赵楠, 等. 黑土、栗钙土和潮土胡敏酸分子结构的差异性分析. 土壤, 2011, 43(5): 804-808
Zheng Y T, Zhao H, Zhao N, et al. Molecular structure differences of humic acid in black soil, chestnut soil and fluvo-aquic soil (In Chinese). Soils, 2011, 43(5): 804-808
- [36] Lynch D H, Voroney R P, Warman P R. Use of ^{13}C and ^{15}N natural abundance techniques to characterize carbon and nitrogen dynamics in composting and in compost-amended soils. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(1): 103-114
- [37] Brunetti G, Plaza C, Clapp C E, et al. Compositional and function features of humic acids from organic amendments and amended soils in Minnesota, USA. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(6):1355-1365
- [38] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability: A literature analysis. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(1):1-12
- [39] 董珊珊, 窦森. 玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 322-328
Dong S S, Dou S. Effect of different ways of corn stover application to soil on composition and structural characteristics of organic carbon in black soil (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(2): 322-328

Effects of Straw Return on Soil Physico-chemical Properties of Chernozem in Northeast China and Maize Yield Therein

FAN Wei WU Jingui[†] LI Jianming HE Ruicheng YAO Yanying WANG Duchao SUN Ling
WANG Caiyun

(College of Resource and Environmental Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract 【Objective】With developing agriculture, the amount of crop residues increases, too, posing a serious environmental concern of how to rationally utilize the by-product. Incorporation of crop residue into the field is one of the optimal ways to recycle crop residue. In Northeast China, straw is returned into the field normally in two ways. One is to plow the returned straw into soil, and the other leave the straw over on the surface of the field as mulch. However, the traditional ways do have some shortcomings, for instance, the returned straw is hard to decompose in the soil; it affects seedling emergence; it makes tillage difficult, and so on. Consequently a new straw returning method is, hereby, invented, that is, even incorporation of straw (EIS), which is implemented in two steps, 1) straw is crashed into pieces, 1~2 cm in length and spread over the field by the combine harvesting the crop; and 2) the straw is plowed evenly into the 0~70 cm soil layer, using the crashing-ridging technology. When the new method is applied, the soil pan is tilled loose, thus reducing the soil bulk density, and improving the soil structure. However, so far little has been done on effects of this new straw incorporation method on soil physico-chemical properties and maize yields. Therefore, in this study, a field experiment was carried out to evaluate effects of EIS on soil physico-chemical properties and maize yields by

comparing EIS with other straw returning modes or methods. **【Method】** The field experiment, laid out in a mono-cropping maize field of chernozem soil in the Zhengbang Farm of Nong'an County, Jilin Province, was designed to have four treatments, i.e. Treatment CK (no straw returned), Treatment SM (straw returned as mulch), Treatment EIS (straw incorporated evenly into the soil using the crashing-ridging technique) and Treatment SP (straw plowed into the soil). Soil bulk density was determined plot by plot using the cutting ring method, and soil compactness, too, with a soil compactness meter; soil aggregates composition analyzed with the dry-sieving and wet-sieving methods; and fulvic acid (FA) and humic acid (HA) extracted with the modified humus component extraction method for analysis of structure with the Fourier transform infrared spectroscopy. Besides, maize yields of the treatments were calculated. **【Result】** Compared with CK, Treatment EIS and Treatment SP significantly reduced soil bulk density by 33.11% and 28.38%, respectively, and Treatment SM did only by 12.16%, and similar trends were found in terms of effects on soil compactness. As for content of > 0.25 mm water-stable soil aggregates, Treatment EIS was 16.71%, 13.18% and 24.29% higher than Treatment CK, SP and SM, respectively. However, all the straw returning treatments increased mean weight diameter (MWD) and water stability coefficient (K), as compared with CK. Treatment EIS, SP and SM was 80.28%, 61.69% and 47.04% higher than Treatment CK in MWD, and 33.69%, 23.71% and 11.40% higher in K. Moreover, Treatment EIS, SP and SM increased soil organic carbon content in the surface soil layer by 27.8%, 15.9% and 7.5%, respectively. Meanwhile, Treatment EIS significantly increased the content of soil humus substances (HEC), soil humic acid carbon (HAC) and fulvic acid (FAC) by 47.6%, 63.3% and 33.8%, respectively, as compared with CK. Among all the straw returning treatments, Treatment EIS was the most significant in effect of increasing the content of HEC, HAC and FAC, being, 28.2%, 26.3% and 30.4%, respectively, higher than Treatment SP and 8.2%, 12.1% and 4.3%, respectively, higher than Treatment SM. Treatments EIS and SP increased soil HAC/FAC, too, being 25% and 21.6% than CK. Moreover, Treatment EIS altered the composition of humus more significantly than all the other treatments, by increasing the proportion of alkyl C and the ratio of aliphatic C/aromatic C, but Treatment SP was relatively higher than Treatment EIS in effect of raising the content of aromatic C. **【Conclusion】** All the findings in this experiment demonstrate that straw returning decreased soil bulk density and soil compactness, accelerated the accumulation of soil organic C and various components of humus, significantly changed the content of >0.25 mm soil water-stable aggregates and the values of mean weight diameter (MWD) and K, improved the structure of soil HA and increased maize yield, with the practice of EIS (even incorporation of straw) in particular, which suggests that the practice of EIS might be an ideal straw returning method to improve physico-chemical properties of the soil and maize yield.

Key words Soil bulk density; Soil aggregate; Soil organic carbon; Soil humus; Even incorporation of straw

(责任编辑: 陈荣府)