

长期化肥有机替代对黑土颜色及腐殖物质的影响

高纪超^{1,2}, 李强^{1,2}, 朱平^{1,2}, 张秀芝^{1,2}, 彭畅^{1,2},
焦云飞^{1,2}, 高洪军^{1,2}, 武俊男¹, 徐灵颖³

(1.吉林省农业科学院, 长春 130033; 2.国家土壤肥力与肥料效益长期定位监测基地,
吉林 公主岭 136100; 3.中国科学院南京土壤研究所江苏常熟农田生态系统野外科学观测研究站, 南京 210008)

摘要: 基于 30 年长期定位试验, 通过测定黑土光谱反射率和不同腐殖质组分含量, 探究了不同施肥对黑土土壤腐殖质含量、土壤颜色及二者之间的关系。试验设置 5 个处理: (1) 休耕 (Fallow); (2) 不施肥处理 (CK); (3) 单施化肥 (NPK); (4) 有机肥部分替代化肥 (NPKM); (5) 秸秆部分替代化肥处理 (NPKS)。结果表明: 与 NPK 处理相比, Fallow、NPKS、NPKM 分别显著提高 49.7%, 74.3%, 27.0% 的土壤有机碳含量 ($p < 0.05$)。NPKM 处理中胡敏酸 (HA) 含量最高为 3.9 g/kg, 随后依次为 CK、NPKS、NPK、Fallow。NPKM、NPKS 和 Fallow 处理中土壤富里酸 (FA) 含量为 2.2~2.3 g/kg, 显著高于 NPK 和 CK。NPKM 处理中胡敏素 (HM) 含量为 18.6 g/kg, 显著高于其他处理 ($p < 0.05$)。不同处理间土壤光谱反射率由高到低依次为 NPK > Fallow、CK > NPKS > NPKM, 与 CK 处理相比, NPK 土壤光谱反射率在平均提高 6.5%, NPKS 和 NPKM 则分别降低 11.1% 和 15.1%。根据线性相关分析结果, 黑土土壤光谱反射率与土壤 HAHM 均呈显著负相关关系 ($p < 0.01$), 相关系数 (r) 分别为 -0.858, -0.681。综合上述结果, 长期有机物料投入可以显著提高黑土腐殖物质含量, 降低黑土光谱反射率, 使黑土颜色加深, 而长期化肥施入则使黑土光谱反射率提高, 出现“褪色”现象, 有机粪肥在黑土中对土壤有机质和腐殖质含量的提升效果优于秸秆。

关键词: 黑土; 土壤腐殖物质; 土壤光谱; 土壤颜色

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0313-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.04.038

Effects of Organic Substitution Chemical Fertilizer on Color and Humic Substances of Black Soil

GAO Jichao^{1,2}, LI Qiang^{1,2}, ZHU Ping^{1,2}, ZHANG Xiuzhi^{1,2}, PENG Chang^{1,2},

JIAO Yunfei^{1,2}, GAO Hongjun^{1,2}, WU Junnan¹, XU Lingying³

(1. Jilin Academy of Agricultural Science, Changchun 130033; 2. National Long-term
Location Monitoring Base on Black Soil Fertility and Fertilizer Efficiency, Gongzhuling, Jilin 136100;

3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Changshu National Agro-Ecosystem
Observation and Research Station, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract: Spectral reflectance and humic substances components were determined aiming at studying the effects of different fertilization on humic substances content and color of black soil based on 30 years long-term location trial. A total of 5 treatments were included in this study: (1) Fallow; (2) No fertilizer application (CK); (3) Only chemical fertilizer (NPK); (4) Organic fertilizer partly replaced chemical fertilizer (NPKM); (5) Straw partly replaced chemical fertilizer (NPKS). Results indicated that soil organic carbon content in Fallow, NPKM, NPKS were significantly increased by 49.7%, 74.3%, 27.0% in contrast with NPK ($p < 0.05$). The highest content of humic acid (HA) was 3.9 g/kg observed in NPKM, and following was in order of CK, NPKS, NPK, Fallow. Soil fulvic acid (FA) contents in NPKM, NPKS and Fallow were in range of 2.2 to 2.3 g/kg, significantly higher than NPK and CK. Soil humin (HM) content in NPKM was 18.6 g/kg, significantly higher than other treatments ($p < 0.05$). The order of soil spectral

收稿日期: 2022-12-13

资助项目: 吉林省农业科技创新工程项目 (CXGC2021RCB006); 科技部基础资源调查专项 (2021FY100400); 农业农村部“科研设施专项运行维护费” (G2022-07-2)

第一作者: 高纪超 (1989—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤培肥研究。E-mail: gaojichao0918@126.com

通信作者: 高洪军 (1975—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤培肥研究。E-mail: ghj-1975@163.com

reflectance from high to low was as following $\text{NPK} > \text{Fallow}, \text{CK} > \text{NPKS} > \text{NPKM}$. In contrast with CK, soil spectral reflectance in NPK was increased by 6.5% on average, while in NPKS and NPKM were decreased by 11.1% and 15.1% in average, respectively. According to the linear correlation analysis results, the spectral reflectance of black soil was significantly negatively correlated with soil HA and HM contents ($p < 0.01$), and the correlation coefficient (r) were -0.858 and -0.681 , respectively. Summing up the results above, it can be concluded that long-term organic materials application could significantly enhance soil humic substance content, lower soil spectral reflectance, and make black soil darker. Oppositely, long-term chemical fertilizer application increased soil spectral reflectance, and made black soil “faded”. The effects of organic manure on improving soil organic materials and humic substances were better than straw.

Keywords: black soil; soil humic substance; soil spectrum; soil color

土壤颜色是土壤对可见光波段的反射光谱特性,是土壤肥力、类别等理化特性的综合反应^[1],是研究土壤属性及其演变,发育程度乃至土壤分类与命名的重要依据^[2]。土壤颜色不同则属性不同,红壤因含有大量的三价铁而呈红色;紫色土颜色的主要决定成分是铁和锰,黑土则由于具有较高的土壤致色组分—土壤腐殖质^[3],而使土壤呈黑色。土壤颜色除受主要致色成分影响外,土壤质地、pH、含水量等也影响土壤颜色。Konen 等^[4]研究指出,土壤颜色随着颗粒尺寸的减小而浅;陈茂春^[5]指出,酸性土壤大多呈深色调,如黑色、褐色等,而碱性土壤则颜色相对较浅;Wills 等^[6]研究发现,土壤有机质含量越高则颜色越深。

土壤腐殖质在土壤中不仅发挥土壤致色作用,同时也是土壤有机质的主要组成成分,占据土壤有机质含量的 60%~90%^[7-8]。在保持肥力、改善土壤环境等方面发挥重要作用,是使黑土成为最适宜作物生长的土壤类型的主要因素之一。长久以来,伴随着化肥长期大量施入和连年高强度的利用使黑土土壤有机质和腐殖质含量逐年下降,造成土壤肥力和固碳能力下降等问题,对黑土健康造成严重威胁^[9]。

为了有效增加黑土土壤腐殖质含量,提高土壤肥力,化肥配施秸秆与畜禽粪便已普遍应用于农业生产当中。董珊珊等^[10]通过 3 年的定位试验研究发现,秸秆还田使土壤腐殖质提高 27.3%~46.1%。迟凤琴等^[11]通过 30 年的长期定位研究发现,畜禽粪肥添加提高 28.2%~110.3% 的土壤腐殖质含量。目前针对不同有机物料添加对黑土土壤颜色影响的研究仍

然较为缺乏,另外虽然土壤腐殖质是黑土主要致色物质的结论已较为明确^[3],但是,土壤腐殖质是一种混合物,主要由胡敏酸(humic acid, HA)、富里酸(fulvic acid, FA)和胡敏素(humin, HM)组成,其中 HA 是深棕色碱溶性物质,FA 是淡黄色酸碱可溶性物质,HM 为不溶性物质^[7-8],三者含量、结构特征与黑土土壤颜色之间的关系也未进行具体研究。

黑土颜色及腐殖质含量是黑土土壤分类和命名的 2 个重要参数依据^[12],因此研究不同施肥措施对黑土颜色、不同腐殖质组分及相互关系在黑土地保护工作中具有重要意义。

综上所述,本研究基于“国家黑土土壤肥力与肥料效益长期定位监测基地”,通过 30 年长期定位试验,测定不同施肥措施对黑土土壤腐殖质不同组分含量、结构特征、土壤光谱反射率影响,提出并验证以下假设:(1)长期单独施用化肥使土壤有机质及腐殖质含量降低,黑土出现“褪色”现象;(2)秸秆及有机物料添加有效提高土壤不同腐殖物质含量,加深黑土颜色;(3)黑土颜色与土壤腐殖质中具有深色特征的 HA 具有一定相关性。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

国家黑土土壤肥力与肥料效益长期定位监测基地位于吉林省公主岭市吉林省农业科学院(124°44'E, 43°30'N)。土壤类型为发育于黄土母质上的典型黑土,气候类型为温带大陆性季风气候,年均气温 5.5℃,年降水量 450~650 mm。试验始于 1989 年(1989 年整地,设置不同处理),初始土壤基础理化性质见表 1。

表 1 土壤初始理化性质

供试土壤	pH	土壤有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
黑土	7.6	13.2	1.4	0.6	18.4	1.2	38.3	29.9	31.8

1.2 试验设计

本研究共选取 5 个处理进行分析:(1)休耕(Fallow);(2)不施肥处理(CK);(3)单施化肥(NPK);

(4)有机肥部分替代化肥(NPKM);(5)秸秆部分替代化肥处理(NPKS)。施肥处理中,肥料均为等氮量投入。种植作物为玉米,密度为 6 万株/hm²,每个处

理试验区面积为 400 m²,未设置重复试验区,因此,在进行土壤样品取样时,在试验区内随机设置 3 个取样点进行取样,取样时间为 2020 年 9 月玉米收获后,取样深度为 0—20 cm。氮肥种类为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。1990—2005 年有机肥为猪粪,2005 年改施牛粪。秸秆来源为试验区秸秆。各处理中磷肥与钾肥以底肥形式一次性施入,氮肥总量的 1/3 作为底肥,2/3 于拔节期追施。有机粪肥于每年玉米收获后以旋耕方式施入试验地,秸秆添加处理是首先将秸秆从田间移除,自然风干后人工粉碎,于第 2 年拔节期追肥后铺于垄沟,作物收获后以旋耕方式与土壤混合。每年收获后各处理地上留茬 15 cm,

与根茬共同还田。各处理施肥量及有机物料基本性质见表 2 和表 3。

表 2 试验处理与施肥量

		单位:kg/hm ²				
试验处理	作物种类	化肥用量			有机物料	
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	秸秆	有机肥(牛粪)
					N	N
Fallow	—	—	—	—	—	—
CK	玉米	—	—	—	—	—
NPK	玉米	165.0	82.5	82.5	—	—
NPKS	玉米	112.0	82.5	82.5	53.0	—
NPKM	玉米	49.5	82.5	82.5	—	115.5

表 3 供试秸秆与有机肥性质(2020 年)

供试材料	有机碳	全氮	全磷	全钾	类胡敏酸	类富里酸
有机肥(牛粪)	283.8±21.6	10.7±3.3	4.3±0.3	8.4±4.3	45.4±5.1	26.4±2.1
秸秆	451.3±36.2	5.8±2.1	2.7±0.4	7.2±6.9	29.6±4.6	57.9±4.8

注:表中数据为平均值±标准差。

1.3 测定方法

土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定;土壤 pH 利用 pH 测定仪检测^[13]。

土壤腐殖质的分离与提取主要采用腐殖质组成修改法^[10]:0.1 mol/L Na₄P₂O₇和 NaOH 混合溶液提取土壤腐殖质,0.5 mol/L H₂SO₄分离 HA 与 FA。各组分含量以含碳量进行表征,通过重铬酸钾外加热法测定。

土壤色调系数(Δlg K),使用 722E 型可见光分光光度计分别测定 HA 与 FA 在波长为 400,600 nm 处的吸光值。

$\Delta\lg K = \lg(400\text{ nm 吸光值}) - \lg(600\text{ nm 吸光值})$ ^[14]。

土壤光谱发射率主要通过暗室波谱仪方法进行测定;在暗室内采用 ASD—Field—Spec—Pro 3 地物波谱仪对土壤进行光谱测量。测试前将土壤样本表面刮、压平整。光源选择为 30 W 卤钨灯,入射天顶角为 30°,以减少土壤粗糙度造成的阴影影响。在样本上方 15 cm 处设置 1°视场角传感器。测试之前去除暗电流影响,利用白色参考板进行反射率矫正。每个土样采集 10 条光谱曲线,算数平均后得到该土样实际反射光谱数据。

1.4 数据处理

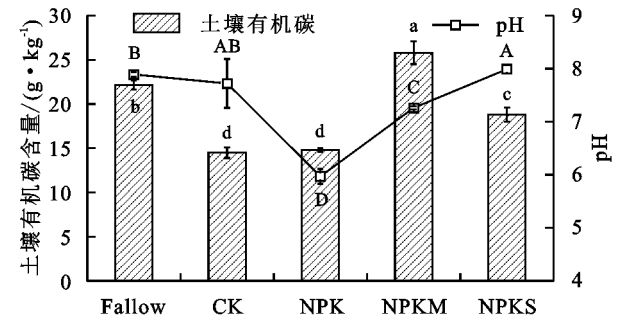
利用 Microsoft Office Excel 2010 软件对数据进行计算,利用 SPSS Statistics 19.0 软件进行差异显著性分析,利用 Origin 9.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥管理措施对土壤有机碳及 pH 的影响

由图 1 可知,土壤有机碳及 pH 受不同施肥措施

影响显著。根据 2020 年试验结果,CK 与 NPK 处理土壤有机碳含量分别为 14.5,14.8 g/kg,显著低于 Fallow、NPKS 与 NPKM($p<0.05$)。与 NPK 处理相比,Fallow、NPKS、NPKM 土壤有机碳含量分别显著提高 49.7%,74.3%,27.0%。2020 年 NPK 处理土壤 pH 为 6.0,显著低于其他处理($p<0.05$),其他处理 pH,由低到高依次为 NPKM(7.3)<CK(7.7)<Fallow(7.9)<NPKS(8.0)。



注:图柱上方不同大写字母表示 pH 在不同处理间差异显著性($p<0.05$);不同小写字母表示土壤有机碳在不同处理间差异显著性($p<0.05$)。下同。

图 1 不同施肥处理对土壤有机碳(SOC)和 pH 的影响

经过 30 年的长期定位试验,与初始土壤(表 1)相比,Fallow、CK、NPK、NPKS、NPKM 土壤有机碳含量分别提高 67.8%,9.8%,12.1%,95.5%,42.4%($p<0.05$)。在土壤 pH 方面,与初始土壤(表 1)相比,NPK、NPKM 处理使土壤 pH 显著降低 21.0%,4.0%($p<0.05$),Fallow 和 NPKS 分别显著提高 4.0%和 5.3%的土壤 pH($p<0.05$),CK 处理 pH 变化并不显著。

2.2 不同施肥措施对土壤腐殖质组成的影响

由图 2 可知,NPKM 处理中 HA 含量最高为 3.9

g/kg, 随后依次为 CK(3.6 g/kg)、NPKS(3.3 g/kg)、NPK(3.2 g/kg)、Fallow(3.0 g/kg)。NPKM、NPKS 和 Fallow 处理 FA 含量分别为 2.3, 2.3, 2.2 g/kg, 显著高于 NPK 和 CK ($p < 0.05$)。在 HM 含量方面,

NPKM 处理中 HM 含量为 18.6 g/kg, 显著高于其他处理 ($p < 0.05$), NPKS 和 Fallow 处理中 HM 含量差异不显著 ($p > 0.05$), 分别为 12.0, 11.2 g/kg, CK 和 NPK 处理 HM 含量最低。

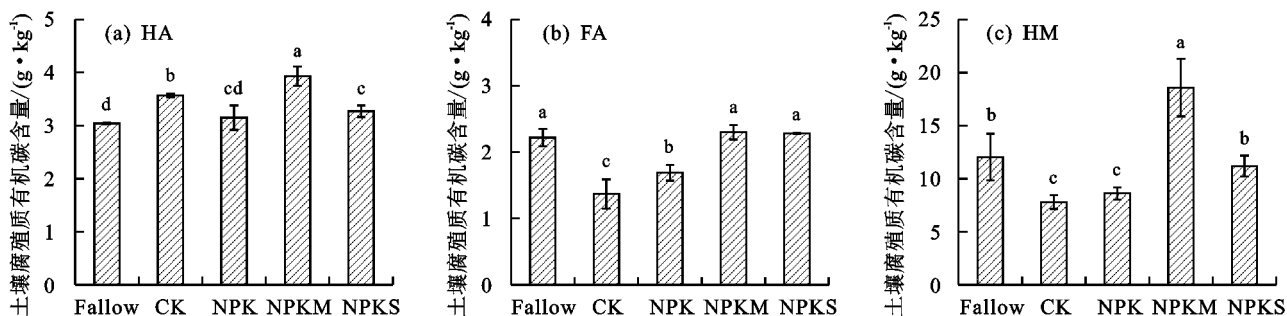


图 2 不同施肥处理对土壤腐殖质含量的影响

2.3 不同施肥措施对黑土光学性质的影响

由图 3 可知, 土壤 HA 与 FA 的色调系数 ($\Delta \lg K$) 由高到低依次为 NPKM(0.743 2)、NPK(0.716 7)、NPKS(0.689 1)、Fallow(0.663 4)、CK(0.626 0), 并且不同处理

之间差异显著 ($p < 0.05$)。FA $\Delta \lg K$ 值在 NPK 处理中最高为 1.543 3, 之后依次为 NPKM(1.376 7)、Fallow(1.270 0)、NPKS(1.183 3)、CK(1.080 0)。

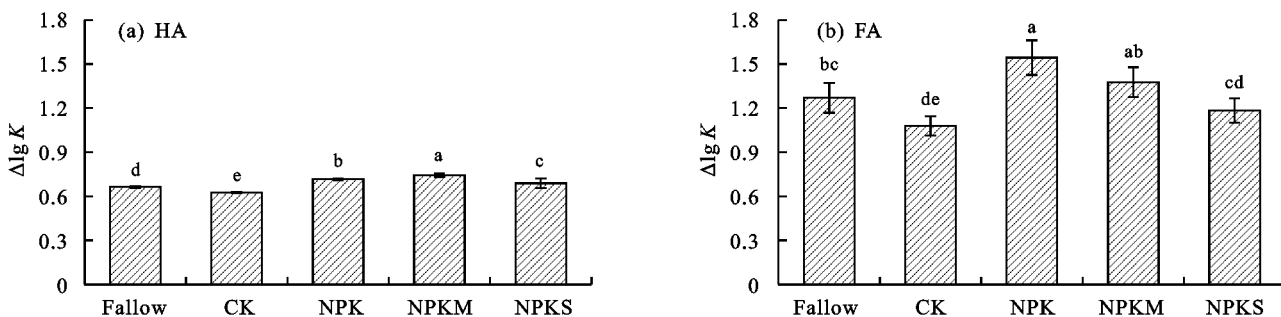


图 3 不同施肥处理对土壤 HA、FA 色调系数 ($\Delta \lg K$) 的影响

黑土土壤反射图谱分析结果(图 4)表明, 黑土对波段由短至长的反射率呈现出先升高后降低的趋势。并且, 长期不同施肥处理间黑土的光谱反射率呈现出较为显著的差异性。其中 NPK 处理光谱反射率最高, 随后依次为 Fallow、CK、NPKS、NPKM。与 CK 处理相比, 在测定波段内 NPK 处理土壤光谱发射率平均提高 6.5%, NPKS 和 NPKM 则平均分别降低 11.1% 和 15.1%。

HA、FA 的色调系数及 HA/FA 间同样具有一定相关性, 但未达到显著的差异水平 ($p > 0.05$)。

3 讨论

本研究中 Fallow、NPKM 与 NPKS 处理与 NPK 处理相比, 均显著提高土壤有机碳的含量(图 1)。Fallow 处理中由于长期休耕, 地上部植被经过 30 年自然演替已形成包括树木、杂草的生态系统, 地上物植被的凋落为土壤输入大量的有机物质。有机肥与秸秆自身同样包含大量有机物质, 因此, 休耕、有机肥与秸秆投入显著提高土壤有机质的含量。另外, 本研究中秸秆有机碳含量显著高于有机肥(表 3), 但其对土壤有机碳的促进作用却小于有机肥, 这与逢娜等^[15]的研究结果相同, 可能由于秸秆自身具有较高的 C/N, 影响其通过微生物向土壤有机质转化的过程。土壤呼吸产生的 CO_2 同样是影响土壤有机质积累的重要因素之一, 有研究^[16]指出, 秸秆还田在作物生育期内对土壤 CO_2 排放速率的促进作用显著高于畜禽粪便, 加剧 CO_2 的排放量, 这可能是造成秸秆在提高土壤有机质效果方面低于有机粪肥的原因

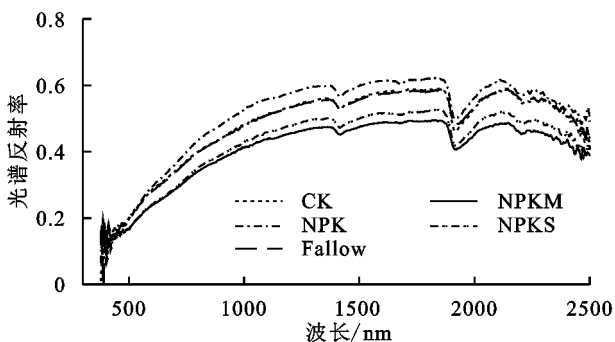
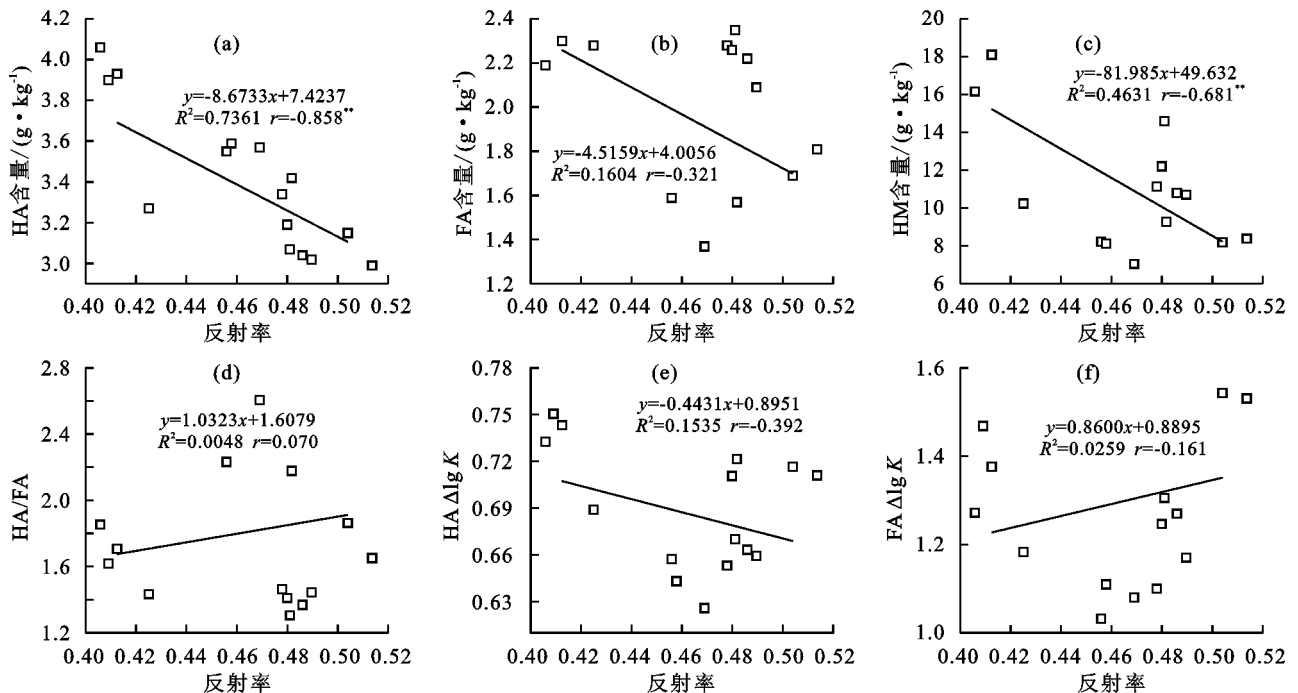


图 4 不同施肥处理下的土壤光谱反射图谱

土壤腐殖质组分和性质与土壤光谱反射率间的线性关系及相关性分析(图 5)指出, 土壤光谱反射率与土壤 HA、HM 含量均呈显著负相关关系 ($p < 0.01$), 相关系数 (r) 分别为 -0.858 和 -0.681, 与 FA 含量,

之一。长期单独施用化肥处理中,土壤有机质含量与初始土壤相比有所提高(表1、图1),这与郝小雨等^[16]的研究结果相反,但与高伟等^[17]、樊廷录等^[18]

的研究结果一致。之所以出现差异,除受土壤类型、气候条件、种植施肥制度、田间管理措施的影响外,作物根茬还田形成的根茬碳补充土壤消耗的碳^[16]。



注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。

图5 黑土土壤反射率与土壤腐殖质的线性关系

秸秆和有机肥中含有一定量的类腐殖质组分(表3),同时在有机肥分解过程中也产生一定量的腐殖质^[19],因此,Fallow、NPKS和NPKM提高土壤腐殖物质含量(HA、FA、HM总和)。多酚学说和起源于木质素的多酚学说认为,土壤腐殖物质形成过程中最先出现的是FA,FA再缩合成HA。HA、FA一旦形成,彼此之间也相互或者单向转化,二者在发生学上存在联系^[20]。早期研究^[21]发现,秸秆进入土壤后,土壤FA形成速度大于HA,随后HA形成速度又逐渐提高,6个月后趋于稳定。环境因素在腐殖物质形成转化中同样发挥重要作用。窦森等^[20]研究表明,在一定范围内,FA形成速率与土壤含水量呈正相关关系,但是在淹水条件下,反而有利于HA的形成。另外在60%田间持水量的条件下,低温更有利于FA的形成。因此,在上述多种因素的综合作用下,使不同处理间土壤腐殖物质组成产生差异。

土壤HA与FA的色调系数($\Delta \lg K$)主要反映土壤腐殖质的分子结构复杂程度, $\Delta \lg K$ 越高,说明腐殖物质分子量较小,分子结构较简单^[14],颜色较浅,反之则颜色较深。李海波等^[22]、高纪超等^[23]的研究指出,施用有机肥能增加胡敏酸上脂肪族侧链的含量,降低其芳香度,使结构简单化,提高 $\Delta \lg K$,使HA在起源上更“年轻”,与本研究的结果相同(图3)。

有研究^[24]还发现,长期施用化肥导致土壤腐殖质“老化”,分子结构缩合度增大,结构复杂化, $\Delta \lg K$ 降低,这与本研究的结果相反(图3),可能与长期使用化肥对土壤pH的影响有关,但是具体原因仍需进一步探究。窦森^[14]研究指出,有机物料投入使FA的缩合度降低, $\Delta \lg K$ 降低,与本研究的结果一致。本研究中HA与FA的色调系数与光谱反射率关系并不显著,这说明HA与FA的结构复杂程度对黑色颜色深浅的影响并不显著。

土壤pH是影响土壤颜色的主要因素之一^[25]。张露心^[25]研究发现,土壤的明度与pH呈显著的负相关关系,这与本研究的结果相反(图4),主要原因与黑土中较高的有机质和腐殖质含量相关。Baumgardner等^[26]早期研究指出,土壤有机质含量超过20 g/kg时,腐殖质在土壤显色中起主导作用,而低于20 g/kg时,则不能有效的掩盖土壤其他因素对光谱效应的影响,本研究土壤样品有机质含量均高于20 g/kg,因此腐殖质的显色作用掩盖pH对土壤颜色的影响。

土壤HA自身是一种暗色物质,较高的HA含量加深土壤颜色。HM是一种不溶性物质,其自身具有较强的吸附性,是土壤中各种有机物质(包括HA、FA)的主要载体,其含量越高,土壤对有机物质的固定能力越强^[14]。土壤FA颜色为较浅的淡黄色,对光谱反射的影

响力低于深棕色的 HA,因此本研究中,土壤的光谱反射率与土壤 HA 和 HM 含量之间呈显著的负相关关系,而与 FA 无显著相关性。另外,窦森等^[27]研究指出,土壤腐殖质之间虽存在相互转化关系,但腐殖质整体的形成是一种颜色逐渐变暗的过程,即腐殖质经黄褐色、红褐色逐渐变为黑褐色的过程。Wills 等^[6]研究发现,土壤有机质和腐殖质的含量越高,则土壤颜色越深,与本研究的结果一致。

4 结论

(1)长期施用化肥在提高黑土土壤有机质含量方面具有一定促进作用,但是与不施用化肥处理相比,使黑土发生“褪色”现象。

(2)有机肥及秸秆添加提高黑土土壤有机质及腐殖物质的含量,并且使黑土颜色“加深”。

(3)黑土土壤颜色深浅(光谱反射率)与土壤 HA、HM 均呈显著负相关关系。

(4)与秸秆还田相比,有机肥在提高黑土土壤有机质和腐殖质含量上具有较为显著的效果。

参考文献:

- [1] 尹辉,李辉,蒋忠诚.典型岩溶区土壤颜色空间自相关和空间分布研究[J].湖北农业科学,2016,55(9):2198-2201.
- [2] Han P C, Dong D M, Zhao X D, et al. A smartphone-based soil color sensor: For soil type classification[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 232-241.
- [3] 管艳霞,陆金妹,马榕均,等.土壤铁氧化物与腐殖质的交叉染色效应研究[J].土壤学报,2023,60(1):138-150.
- [4] Konen M E, Burras C L, Sandor J A. Organic carbon, texture, and quantitative color measurement relationships for cultivated soils in north central Iowa[J]. Soil Science of America Journal, 2003, 67(6):1823-1830.
- [5] 陈茂春.土壤酸碱性的简易识别[J].科学种养,2010(5):12.
- [6] Wills S A, Burras C L, Sandor J A. Prediction of soil organic carbon content using field and laboratory measurements of soil color[J]. Soil Sciences Society American Journal, 2007, 71:380-388.
- [7] Dou S, Shan J, Song X Y, et al. Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness[J]. Pedosphere, 2020, 30(2):159-167.
- [8] Gao J C, Luo J F, Lindsey S, et al. Effects of soil properties on urea-N transformation and efficacy of nitrification inhibitor 3,4-demethylpyrazole phosphate(DMPP)[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 68(1):228-237.
- [9] Gerke J. Concepts and misconceptions of humic substances as the stable part of soil organic matter: A review[J]. Agronomy, 2018, 8:76-92.
- [10] 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的影响[J].土壤学报,2017,54(1):150-159.
- [11] 迟凤琴,蔡姗姗,匡恩俊,等.长期施肥对黑土有机无机复合度及结合态腐殖质的影响[J].东北农业大学学报,2014,45(8):20-26.
- [12] 龚子同,张甘霖,陈志诚,等.土壤发生与系统分类[M].北京:科学出版社,2007.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 窦森.土壤有机质[M].北京:科学出版社,2010.
- [15] 逢娜,程松,张水梅,等.化肥配施有机肥对黑土肥力与春玉米产量的影响[J].华北农学报,2021,36(4):124-131.
- [16] 郝小雨,马星朱,周宝库,等.长期不同施肥措施下黑土有机碳的固存效应[J].水土保持学报,2016,30(5):316-321.
- [17] 高伟,杨军,任顺荣.长期不同施肥模式下华北旱作潮土有机碳的平衡特征[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1465-1472.
- [18] 樊廷录,王淑英,周广业,等.长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J].中国农业科学,2013,46(2):300-309.
- [19] 龚伟,颜晓元,王景燕,等.长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤腐殖质组分碳和氮的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(6):1245-1252.
- [20] 窦森,李凯,崔俊涛,等.土壤腐殖物质形成转化与结构特征研究进展[J].土壤学报,2008,45(6):1148-1158.
- [21] 姜岩,窦森.土壤施入有机物料后重组有机质变化规律的探讨[J].土壤学报,1987,24(2):98-104.
- [22] 李海波,韩晓增,王凤,等.不同土地利用下黑土密度分组中碳、氮的分配变化[J].土壤学报,2008,45(1):112-119.
- [23] 高纪超,关松,许永华.不同畜禽粪肥对农田栽参土壤养分及腐殖物质组成的影响[J].江苏农业科学,2017,45(6):255-259.
- [24] 张夫道.长期施肥条件下土壤养分的动态和平衡 I.对土壤腐殖质积累和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,1995,1(3/4):10-21.
- [25] 张露心.基于土壤颜色及环境辅助变量的土壤 pH 和有机质预测研究[D].成都:四川农业大学,2019.
- [26] Baumgardner M F, Kristof S, Johannsen C J, et al. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils[J]. Indiana Academy of Science, 1970, 3939:413-422.
- [27] 窦森,肖彦春,张晋京.土壤胡敏素各组分数量及结构特征初步研究[J].土壤学报,2006,43(6):934-940.