

不同土地利用方式对黑土胶散复合体的影响及与酸度的关系

丁慧仪, 王淑华, 王继红

(吉林农业大学, 长春 130118)

摘要: 以吉林省黑土玉米带区域内 10 对长期定位采样点的 2 种土地利用方式土壤(耕作黑土和防护林带黑土)为研究对象,采用胶散分组法提取土壤胶散复合体,探究长期不同利用方式对黑土胶散复合体和酸度的影响。结果表明:耕作黑土与防护林带黑土均表现为 G_0 与 G_2 组的绝对含量增加, G_1 组的绝对含量下降,复合体总量分别下降了 3.88% 和 0.28%。耕作黑土和防护林带黑土 pH 分别平均下降 12.12% 和 3.77%,有机碳含量在耕作黑土和防护林带黑土中分别平均下降 23.17% 和 9.00%,2 种利用方式土壤的胡敏酸、富里酸、交换性钙离子和碳酸钙均出现下降;耕作黑土分别平均下降 12.18%, 3.53%, 16.29%, 31.53%;防护林带黑土分别平均下降 20.07%, 13.14%, 2.81%, 7.81%。 G_1 组与 pH、HA、 Ca^{2+} 和 $CaCO_3$ 呈极显著正相关,与 FA 呈显著负相关; G_2 组与 pH、HA、 Ca^{2+} 和 $CaCO_3$ 呈极显著负相关。pH 与 HA、 Ca^{2+} 和 $CaCO_3$ 呈极显著正相关,与 FA 呈显著负相关。经过 11 年的变化,黑土胶散复合体稳定性下降,相比非耕作状态下黑土,耕作模式下的黑土胶散复合体稳定性下降更为严重,胶散复合体总量下降的更多,酸度下降更为明显。 Ca^{2+} 和 HA 的变化是影响黑土土壤酸化和土壤团聚体稳定性的主要驱动因素。土壤酸化的结果使土壤胶散复合体数量减少,稳定性变差。

关键词: 土地利用方式; 胶散复合体; 胶结物质; 酸度

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0369-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.051

Effects of Different Land Uses on Black Soil Colloidal Complex and Its Relationship with Acidity

DING Huiyi, WANG Shuhua, WANG Jihong

(Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: In order to explore the effects of long-term different land uses on the colloidal complex and acidity of black soil, the soil colloid dispersion complex was extracted by colloid dispersion grouping method based on 10 pairs of long-term soil positioning sampling point (tillage black soil and shelterbelt black soil) in the black soil corn belt of Jilin Province. The results showed that the absolute contents of cultivated black soil and shelterbelt black soil increased in G_0 and G_2 groups, but decreased in G_1 group, and the total amount of complex decreased by 3.88% and 0.28%, respectively. The pH of cultivated black soil and shelterbelt black soil decreased by 12.12% and 3.77% respectively, and the contents of organic carbon in cultivated black soil and shelterbelt black soil decreased by 23.17% and 9.00% respectively. Humic acid, fulvic acid, exchangeable calcium ion and calcium carbonate decreased in the two land uses, and the average decrease in cultivated black soil was 12.18%, 3.53%, 16.29% and 31.53%, respectively. The black soil of shelterbelt decreased by 20.07%, 13.14%, 2.81% and 7.81%, respectively. The G_1 group showed extremely significant positive correlations with pH, HA, Ca^{2+} and $CaCO_3$, and significantly negative correlations with FA; while G_2 group had extremely significant negative correlations with pH, HA, Ca^{2+} and $CaCO_3$. Soil pH was significantly positively correlated with HA, Ca^{2+} and $CaCO_3$, and negatively correlated with FA. After 11 years, the stability of black soil colloid-dispersion complex decreased. Compared with non-tillage black soil, the stability of black soil colloid-dispersion complex decreased more seriously. The total amount of colloid-dispersion complex decreased more, and the acidity decreased more obviously than that of non-tillage black soil. The

收稿日期: 2019-12-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(41877027)

第一作者: 丁慧仪(1994-), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤退化基础研究。E-mail: 769919172@qq.com

通信作者: 王继红(1966-), 女, 博士生导师, 主要从事土壤修复技术研究。E-mail: wjh489@126.com

changes of Ca^{2+} and HA were the main driving factors affecting soil acidification and the stability of soil aggregates in black soil. As a result of soil acidification, the number of soil colloid-dispersion complex decreased and its stability became worse.

Keywords: land use; cement dispersion complex; cementation substance; acidity

土壤酸化是农业用地普遍存在的一种状况,这在世界范围内已经得到了广泛的报道^[1-3]。严重的土壤酸化会妨碍农业用地为作物提供足够的营养元素和正常的生长环境,从而降低土地生产力和农作物的产量^[4],并且对全球生物和地球化学元素循环产生相当大的负面影响^[5]。Guo 等^[6]发现,1980—2000 年,中国主要农作物生产地区的 pH 显著下降。张福锁^[7]认为,中国农田土壤普遍存在严重酸化问题,这种问题不但会影响作物根系生长,还会活化土壤中的重金属元素,并可能加重土传病虫害的发生。

土壤中的胶结物质主要包括有机胶结物质(有机质)和无机胶结物质(氧化物和碳酸盐)。土壤有机无机复合体是土壤区别于母质的基本特征之一^[8],也是形成良好土壤结构的重要原因^[9],对于土壤形成过程中物质的迁移和积累能起到重要作用。它还是土壤有机碳的主要物理保护因素,可使土壤有机碳抵抗矿化和微生物分解的能力增强^[10]。土壤有机无机复合体的性质与土壤结构状况密切相关,是组成土壤良好结构的基本单元,同时也是土壤肥力的重要物质基础。它会影响到水的流动和溶质的运输,因为土壤结构单元之间的优先旁路流动可以使化学物质更快的移动到更深的位置。目前有机无机复合体的分离分为合成法和分离法,现阶段分离法的运用较为广泛^[11]。最早研究分离法是丘林在 20 世纪 30 年代创立的胶散分组法。丘林将土壤复合体分为钙结合的复合体(称 I 组或 G_1 组)和铁铝氧化物结合复合体(称 II 组或 G_2 组)^[12]。后期傅积平等^[13]、杨彭年^[14]在丘林胶散分组法的基础上将土壤复合体分为水分散复合体(G_0)、钠质分散复合体(G_1)以及研磨分散复合体(G_2)3 组,这对有机无机复合体的研究起到了十分重要的作用。

吉林省作为我国重要的黑土分布区,玉米是其重要的农业作物,随着土壤开垦时间和连作年限的增长以及肥料的大量使用和高强度的农业生产方式,导致黑土区土壤退化严重,已出现明显的酸化和肥力下降现象^[15]。目前,有关土壤酸化原因和缓冲机制等方面已有大量研究,但关于土壤酸化与土壤结构退化的内部联系尚不清楚。而胶散复合体中的 G_1 组是由钙键结合的复合体,对土壤良好结构的形成起着重要的作用; G_2 组对土壤结构的稳定性方面起着非常重要的作用^[16]。且有研究^[17]表明,在有机质含量较高、黏粒和氧化铁铝

含量较低的黑土中,有机质的胶结作用占主导地位。对于松辽平原玉米带土壤而言,胶散复合体组成及腐殖质含量是导致黑土耕层土壤保水保肥性能具有较大差异的主要原因之一。综上,本文选取了同一生物气候条件下,地理位置相近的长期玉米耕作黑土和未经耕作和施肥的防护林带黑土进行对照采样,探讨 2 种不同利用方式土壤在 2007—2018 年,不同土地利用方式对黑土胶散复合体及酸度的影响。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

分别于 2007 年 10 月和 2018 年 10 月布设采样点采集 2 类土壤,采集区域南起吉林省四平市郊区,北至吉林省松原市扶余县与黑龙江省交界处,以及长春至伊通公路两侧 2~5 km;长春至双阳公路两侧 2~5 km 范围。在长期定位采样点分别采集玉米耕作黑土和同一生物气候条件下地理位置相近的防护林带黑土,2 次采样点为同一固定点位,其中,耕作土壤 11 年中连作玉米,常规耕作。施肥量为纯 N 230 kg/hm², P₂O₅ 85 kg/hm², K₂O 90 kg/hm², 无秸秆还田;防护林带覆被状况一致,且 11 年间无变化。采样深度 0—20 cm。采样点位置见表 1。

表 1 供试土壤采样位置

序号	经纬度	采样位置
1	44°04'24"N, 125°25'26"E	102 国道 1 094 km 处三胜乡
2	44°11'47"N, 125°32'51"E	102 国道 1 113 km 处晨光村
3	43°45'38"N, 125°07'11"E	102 国道 1 036 km 处泡子沿村
4	43°38'24"N, 124°57'51"E	102 国道 1 017 km 处田庆村
5	43°33'01"N, 124°53'15"E	102 国道 1 003 km 处四家子村
6	43°27'37"N, 124°46'55"E	102 国道 990 km 处靠山大队
7	43°17'48"N, 124°32'02"E	102 国道 961 km 处西黑嘴村
8	43°40'34"N, 125°23'50"E	长伊公路 19 km 处水库南
9	43°38'34"N, 125°23'30"E	长伊公路 24 km 处大房李村
10	43°37'59"N, 125°34'18"E	长清公路 23 km 处新星采油厂路口

1.2 胶散复合体及土壤理化性质测定方法

有机无机复合体的分组提取: G_0 组(水分散组)按陈家坊等^[18]方法分离; G_1 组复合体在提取 G_0 后,加入 1 mol/L NaCl 溶液浸提,直至上清液中无钙离子反应,然后加水按提取 G_0 组步骤提取 G_1 组复合体。 G_2 组经超声处理机分散后,再按 G_0 组提取法分离 G_2 组复合体。经分离所得的 G_0 、 G_2 组悬浊液静止放置, G_1 组悬浊液用稀 H_2SO_4 聚沉,再用酒精洗涤离心。湿样经 40 °C 恒温干燥后称重并计算。

腐殖质组成:采用腐殖质组成修改法,用 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L Na₄P₂O₇混合碱液提取,腐殖酸各组分有机碳用重铬酸钾外加热法测定^[19],色调系数($\Delta \log K$)参照 Kyoichi 等^[20]的方法,其他土壤理化性质采用《土壤农化分析》^[21]中的相关方法。

1.3 样品分析与数据处理

数据整理和图表绘制采用 Excel 2010 软件,数据相关性和多元线性回归分析采用 SPSS 20.0 软件。

2 结果与分析

2.1 不同利用方式土壤胶散复合体各组分的变化

耕作黑土和防护林带黑土 2 种不同利用方式土壤胶散复合体的含量和变化见表 2。耕作黑土的 G₀组在

2007 年时的平均相对含量为 23.51%,到 2018 年平均相对含量上升到 32.57%;防护林带黑土的 G₀组相对含量由 2007 年的 20.03%上升到 2018 年的 27.70%,同一年份相同采样点,均表现为耕作黑土 G₀组相对含量高于防护林带黑土 G₀组的相对含量。耕作黑土和防护林带黑土 G₀组平均增加量分别为 31.43,28.93 g/kg。通过 *t* 检验可知,经过 11 年的变化,耕作黑土和防护林带黑土的 G₀组含量显著增加($P < 0.05$),除 6 号采样点外,其余 9 个采样点在 2007 年和 2018 年均表现为耕作黑土 G₀组绝对含量大于防护林带黑土,但同一年份中,2 种不同利用方式土壤 G₀组绝对含量和相对含量的变化相比,没有明显规律。

表 2 供试土壤各组分含量

单位:g/kg

年份	序号	耕作黑土复合体含量				防护林带黑土复合体含量			
		G ₀	G ₁	G ₂	G ₀ +G ₁ +G ₂	G ₀	G ₁	G ₂	G ₀ +G ₁ +G ₂
2007	1	105.00	286.00	24.50	415.50	84.00	272.00	14.50	370.50
	2	83.50	289.00	19.50	392.00	68.50	314.50	16.25	299.25
	3	95.75	284.25	34.50	414.50	73.25	277.50	23.75	374.50
	4	79.75	225.25	35.50	340.50	62.50	281.25	20.00	363.75
	5	84.00	297.50	22.50	404.00	68.00	254.00	27.00	349.00
	6	76.50	270.75	33.75	381.00	78.50	288.00	22.50	389.00
	7	83.00	301.25	38.00	422.25	79.00	293.25	20.50	392.75
	8	108.75	296.25	24.00	429.00	86.50	278.25	21.50	386.25
	9	99.00	264.75	19.00	382.75	72.50	310.75	13.50	396.75
	10	125.25	271.75	17.50	414.50	91.00	283.00	17.00	391.00
	平均值	94.05	278.68	26.88	399.60	76.38	285.25	19.65	381.28
2018	1	135.75	235.25	36.25	407.25	86.75	261.75	21.00	369.50
	2	124.25	225.25	29.25	378.75	112.25	267.75	25.00	405.00
	3	131.00	234.75	37.50	403.25	91.00	244.50	31.00	366.50
	4	112.00	178.75	41.50	332.25	93.75	255.25	24.00	373.00
	5	122.25	218.75	37.00	378.00	97.00	224.50	30.25	351.75
	6	94.00	219.75	43.75	357.50	118.00	241.25	29.00	388.25
	7	117.75	232.25	46.50	396.50	109.75	247.25	27.50	384.50
	8	162.50	214.25	37.50	414.25	121.75	239.50	31.00	392.25
	9	113.75	218.75	36.25	368.75	107.50	251.00	28.50	396.00
	10	141.50	231.75	31.75	405.00	115.25	241.50	27.50	384.25
	平均值	125.48	220.95	37.73	384.15	105.30	248.33	27.48	381.10

耕作黑土和防护林带黑土 G₁组绝对含量较 11 年前均出现下降,且耕作黑土的减少量整体大于防护林带黑土。2 种不同利用方式土壤平均减少量分别为 57.73,36.93g/kg。2007 年时,同一采样点的 2 种不同利用方式土壤 G₁组绝对含量相比,没有明显规律,到 2018 年时,耕作黑土的 G₁组绝对含量均小于防护林带黑土。耕作黑土 G₁组在复合体中的相对含量经过 11 年的变化由 69.71%下降到 57.54%,防护林带黑土 G₁组相对含量由 74.78%下降到 65.19%,耕作黑土和防护林带黑土的 G₁组含量经过 11 年时

间显著降低($P < 0.05$)。同一年份中,耕作黑土 G₁组的相对含量均低于防护林带黑土 G₁组的相对含量。

2 种不同利用方式黑土的 G₂组绝对含量较 11 年前出现增加,耕作黑土的增加量整体大于防护林带黑土。耕作黑土和防护林带黑土的平均增加量分别为 10.85,7.83 g/kg。耕作黑土 G₂组的平均相对含量由 11 年前的 6.78%,上升到 2018 年的 9.89%,防护林带黑土 G₂组的平均相对含量经过 11 年由 5.19%上升到 7.24%。相同年份的同一采样点,均表现为耕作黑土 G₂组绝对含量和相对含量都高于防护林带黑土。

水稳性复合体含量($G_1 + G_2$)在 2 种不同利用方式土壤中较 11 年前均表现为下降,2 种不同利用方式土壤平均减少量分别为 46.88,29.10 g/kg,耕作黑土的减少量大于防护林带黑土。相同年份中,相同采样点的 2 种不同利用方式土壤 $G_1 + G_2$ 组绝对质量相比,没有明显规律,但耕作黑土 $G_1 + G_2$ 组的相对含量整体均低于防护林带黑土。耕作黑土 $G_1 + G_2$ 组在复合体中的相对含量经过 11 年的变化由 76.49% 下降到 67.43%,防护林带黑土 $G_1 + G_2$ 组相对含量由 79.97% 下降到 72.42%。

复合体总量($G_0 + G_1 + G_2$)较 11 年前出现下降,耕作黑土和防护林带黑土平均减少量分别为 15.45,0.18 g/kg。2 种利用方式土壤胶散复合体总量没有明显的规律。

2.2 不同利用方式土壤的酸度变化

不同利用方式土壤酸度变化见表 3。10 对采样点的 2 种利用方式土壤的酸度在 11 年间均发生了变化,且变化幅度在耕作黑土和防护林带黑土之间差异达到显著水平。2018 年时,相同采样点土壤的平均 pH 分别 5.54,6.66。耕作黑土 pH 下降幅度明显大于防护林带黑土,耕作黑土的 pH 下降 9.39%~14.96%,平均下降 12.12%,防护林带黑土 pH 下降均值为 3.77%,下降范围在 0.28%~9.22%。耕作黑土的 pH 下降显著($P < 0.05$),防护林带黑土的 pH 变化不显著。较 11 年前相比,2 种利用方式土壤中 H^+ 和 Al^{3+} 的浓度均出现上升,且 2 种离子在耕作黑土中浓度的增加量均高于在防护林带黑土中浓度的增加量。

表 3 不同利用方式土壤的酸度变化

年份	序号	耕作黑土			防护林带黑土		
		pH	$H^+ /$ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	$Al^{3+} /$ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	pH	$H^+ /$ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	$Al^{3+} /$ ($cmol \cdot kg^{-1}$)
2007	1	6.25	0.02	0.06	7.49	0	0
	2	5.70	0.28	0.19	7.12	0	0.06
	3	5.72	0.16	0.04	7.01	0	0.11
	4	5.70	0.22	0.66	7.08	0	0
	5	6.28	0.10	0.24	5.72	0.14	0
	6	6.55	0.01	0.01	6.35	0.12	0.05
	7	5.91	0.07	0.49	6.98	0.02	0
	8	7.30	0	0.15	7.05	0	0.02
	9	6.48	0.08	0.07	7.17	0	0
	10	7.15	0.01	0.05	7.24	0.01	0.01
	平均值	6.30	0.10	0.20	6.92	0.03	0.03
2018	1	5.40	0.14	0.21	7.33	0.03	0
	2	4.99	0.39	0.36	7.07	0.04	0.07
	3	5.05	0.22	0.15	6.95	0.05	0.11
	4	5.02	0.31	0.78	7.06	0.04	0
	5	5.69	0.19	0.40	5.45	0.16	0
	6	5.57	0.13	0.14	6.18	0.15	0.09
	7	5.28	0.17	0.56	6.46	0.05	0.03
	8	6.36	0.11	0.34	6.40	0.08	0.08
	9	5.74	0.17	0.12	7.12	0.06	0.04
	10	6.30	0.12	0.37	6.58	0.11	0.13
	平均值	5.54	0.20	0.34	6.66	0.08	0.06

2.3 不同利用方式土壤胶结物质的含量变化

2.3.1 土壤利用方式对有机碳和腐殖酸含量及胡敏酸光学特征的影响 土壤有机碳(SOC)含量在不同利用方式土壤中经 11 年的变化情况见表 4。耕作黑土的有机碳含量下降 17.16%~28.70%,平均下降 20.61%,防护林带黑土有机碳含量下降 5.81%~12.10%,平均下降 8.65%,SOC 含量耕作黑土和防护林带黑土之间差异达到显著水平。不同利用方式的土壤中,胡敏酸(HA)和富里酸(FA)的变化也表现出一定的

差异性。同一采样点的不同利用方式土壤中,耕作黑土胡敏酸的含量下降 5.01%~22.31%,平均下降 12.18%,HA 和 FA 变化显著($P < 0.05$);防护林带黑土胡敏酸含量下降 0.41%~7.94%,平均下降 3.53%。耕作黑土富里酸的含量下降 15.36%~24.73%,平均下降 20.07%;防护林带黑土富里酸含量下降 6.99%~17.27%,平均下降 13.14%。有机碳和胡敏酸在耕作黑土中的含量整体低于防护林带黑土,而富里酸在耕作黑土中的含量整体高于防护林带黑土。

表 4 不同利用方式土壤有机碳和腐殖酸含量变化

单位:g/kg

年份	序号	耕作黑土			防护林带黑土		
		SOC	HA	FA	SOC	HA	FA
2007	1	14.30	7.26	2.66	20.18	8.89	2.24
	2	16.85	6.63	3.38	17.81	8.69	2.49
	3	16.97	6.45	2.64	23.62	6.65	2.05
	4	17.86	4.46	3.26	20.73	7.62	2.21
	5	13.77	6.02	2.21	21.97	5.93	2.14
	6	19.00	7.48	2.39	25.91	7.22	2.07
	7	18.64	6.45	2.93	22.43	6.83	1.93
	8	18.40	7.29	2.85	26.45	7.22	2.29
	9	19.30	6.56	2.79	24.72	10.20	2.35
	10	19.96	6.81	3.04	23.05	9.27	2.53
平均值		17.51	6.54	2.82	22.69	7.85	2.23
2018	1	11.06	6.31	2.03	19.40	8.82	1.93
	2	15.39	5.52	2.77	17.48	8.00	2.06
	3	15.26	6.01	2.13	23.23	6.50	1.83
	4	16.28	4.16	2.74	19.75	7.45	1.85
	5	12.68	5.71	1.73	21.15	5.68	1.91
	6	16.77	5.81	1.86	24.97	7.19	1.72
	7	17.07	6.13	2.48	21.87	6.67	1.66
	8	15.24	6.34	2.30	25.27	6.82	2.13
	9	17.77	5.37	2.10	23.65	9.78	1.96
	10	18.25	6.08	2.36	21.25	8.85	2.32
平均值		15.58	5.74	2.25	21.80	7.58	1.94

HA 的光学特性是判断土壤腐殖质特性的重要依据。一般认为, $\Delta \log K$ 值能够反映腐殖质组分结构的复杂程度, $\Delta \log K$ 值越低, 说明其分子结构越复杂^[22]。不同利用方式土壤中胡敏酸的吸光值 ($\Delta \log K$ 值) 见图 1, 表现为耕作黑土胡敏酸的吸光值均低于同一采样点的防护林带黑土, 说明耕作黑土的胡敏酸结构比防护林带黑土的复杂。这说明耕作模式中 HA 分子变的更复杂, 土壤腐殖化程度变高。

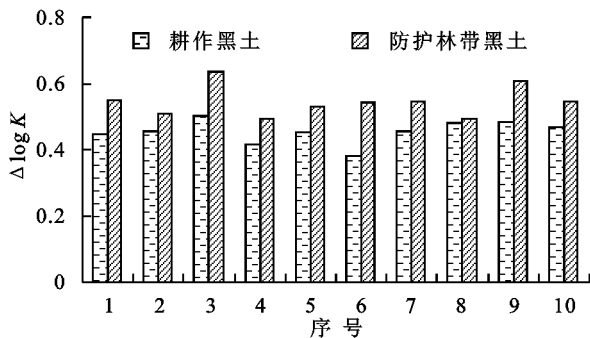


图 1 不同利用方式土壤胡敏酸光学特征

2.3.2 土壤利用方式对交换性钙离子和碳酸钙含量的影响 供试土壤交换性钙离子和碳酸钙含量变化见表 5。2 种利用方式土壤交换性钙离子和碳酸钙含量整体表现为下降。耕作黑土中 Ca^{2+} 平均下降了

16.29%, $CaCO_3$ 平均下降了 31.53%; 防护林带黑土中 Ca^{2+} 整体下降了 2.81%, $CaCO_3$ 平均下降了 7.81%。 Ca^{2+} 和 $CaCO_3$ 在耕作黑土中的含量整体低于防护林带黑土, HA 和 FA 变化显著 ($P < 0.05$)。

表 5 供试土壤交换性钙离子和碳酸钙含量的变化

年份	序号	耕作黑土		防护林带黑土	
		$Ca^{2+}/$ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	$CaCO_3/$ ($g \cdot kg^{-1}$)	$Ca^{2+}/$ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	$CaCO_3/$ ($g \cdot kg^{-1}$)
2007	1	19.18	7.80	21.30	7.60
	2	19.37	5.91	21.24	10.84
	3	18.63	7.00	20.28	10.35
	4	15.04	7.74	21.18	10.67
	5	18.91	8.82	16.36	7.39
	6	17.68	5.52	18.45	9.07
	7	16.42	8.92	18.65	9.35
	8	19.85	8.88	17.88	7.64
	9	18.31	6.96	20.40	10.76
	10	19.89	7.30	18.30	8.50
平均值		18.33	7.48	19.40	9.22
2018	1	16.88	7.40	20.88	7.40
	2	15.90	4.01	21.09	8.24
	3	16.71	5.50	19.41	10.05
	4	11.24	6.34	20.32	10.47
	5	14.36	4.12	16.18	7.19
	6	14.25	2.42	17.61	8.67
	7	12.75	5.92	18.51	8.25
	8	16.51	5.18	17.23	6.24
	9	16.93	4.86	19.85	10.16
	10	17.89	5.50	17.51	7.30
平均值		15.43	5.13	18.86	8.50

2.4 胶散复合体变化与土壤酸度及胶结物质的相关性分析

2.4.1 胶散复合体与土壤酸度的关系 由表 6 可知, G_1 组与 pH 呈极显著正相关, 与 H^+ 和 Al^{3+} 呈极显著负相关, G_2 组与 pH 呈极显著负相关, 与 H^+ 呈显著正相关, 与 Al^{3+} 含量呈极显著正相关。

表 6 胶散复合体与土壤酸度之间的关系

复合体	pH	H^+	Al^{3+}
G_0	-0.323	0.300	0.423
G_1	0.750**	-0.715**	-0.749**
G_2	-0.726**	0.470*	0.675**

注: 在 0.05 级别 (双尾), 相关性显著; 在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著。下同。

2.4.2 胶散复合体、土壤 pH 与胶结物质的关系 由表 7 可知, G_1 组与 HA、 Ca^{2+} 和 $CaCO_3$ 呈极显著正相关, 与 FA 呈显著负相关。 G_2 组与 Al^{3+} 含量呈极显著正相关, 与 HA、 Ca^{2+} 和 $CaCO_3$ 呈极显著负相关, 与 SOC 呈显著负相关。 pH 与 HA、 Ca^{2+} 和 $CaCO_3$ 呈极显著正相关, 与土壤 SOC 呈显著正相关; 与 Al^{3+} 呈极显著负相关, 与 FA 呈显著负相关。

表 7 胶散复合体与胶结物质之间的关系

指标	SOC	HA	FA	Al ³⁺	Ca ²⁺	CaCO ₃
G ₀	-0.432	-0.252	0.409	0.423	-0.255	-0.375
G ₁	0.431	0.834**	-0.494*	-0.749**	0.878**	0.618**
G ₂	-0.494*	-0.664**	0.330	0.675**	-0.858**	-0.616**
pH	0.556*	0.801**	-0.462*	-0.594**	0.845**	0.660**

2.5 胶结物质对土壤胶散复合体和 pH 变化的贡献评价

本研究利用多元线性回归模型来分析各胶结物质对土壤酸度变化的影响。分别将 HA、FA、Ca²⁺、Al³⁺、CaCO₃ 作为自变量,将土壤 pH 和 G₁ 设为因变量。相关研究表明自变量和因变量之间的关系可以用线性回归分析模型来解析^[23]。方差膨胀因子(VIF)和容差确定多元线性分析模型的变异程度。通常来讲,当容差>0.1 时表示线性相关,方差膨胀因子<10 时代表线性相关,德宾-沃森系数值在 1.5~2.5,说明无自相关现象。

多元线性回归模型量化不同胶结物质对 pH 变化的贡献分析见表 8 和表 9。5 种胶结物质均表现为线性相关,VIF 和容差的解释变量均在 0.1~10,说明共线性没有问题,为最优回归模型。德宾-沃森系数值在 1.5~2.5,说明胶结物质之间无自相关现象。在 5 种胶结物质中,HA 和 Ca²⁺ 对 G₁ 组有显著影响(P<0.05),均与 G₁ 组呈显著正相关关系。pH 被 HA 和 Ca²⁺ 显著影响,pH 与 HA 和 Ca²⁺ 均呈显著正相关关系。

表 8 胶结物质与 G₁ 组含量之间的关系

胶结物质	土壤 G ₁ 组含量		共线性分析	
	标准化系数	显著性	容差	膨胀因子
HA	0.405	0.024	0.414	2.418
FA	-0.080	0.616	0.437	2.287
Ca ²⁺	0.493	0.046	0.208	4.805
Al ³⁺	-0.053	0.817	0.208	4.817
CaCO ₃	0.002	0.990	0.502	1.993
R ²	0.851			
调整后 R ²	0.798			
德宾-沃森	2.280			

表 9 胶结物质与 pH 之间的关系

胶结物质	土壤 pH		共线性分析	
	标准化系数	显著性	容差	膨胀因子
HA	0.407	0.029	0.414	2.418
FA	-0.284	0.103	0.437	2.287
Ca ²⁺	0.761	0.006	0.208	4.805
Al ³⁺	0.474	0.064	0.208	4.817
CaCO ₃	0.031	0.839	0.502	1.993
R ²	0.838			
调整后 R ²	0.781			
德宾-沃森	1.582			

3 讨论

Kong 等^[24] 研究表明,农业土地利用方式的不同会极大地影响土壤的结构和养分的含量。土壤胶散复合体是土壤结构的物质基础^[25],本研究结果显示,无论土壤是否进行耕作,土壤胶散复合体组成都会发生变化,但耕作黑土的土壤胶散复合体变化大于非耕作黑土(防护林带黑土)。耕作黑土和非耕作黑土(防护林带黑土)复合体总量(G₀+G₁+G₂)较 11 年前均出现下降,但未经耕作的防护林带黑土复合体总量的下降程度明显小于连作玉米土壤。以往研究^[26] 表明,长期耕种且未施用有机肥或有机肥施用量低,导致土壤 SOC 含量降低,Guo 等^[27] 研究发现,常规耕作的土壤中 SOC 的含量比免耕土壤高 26%。本试验数据显示,长期耕作黑土和非耕作黑土 SOC 较 11 年前均出现下降,耕作黑土的 SOC 下降量明显高于非耕作黑土。本研究数据显示,耕作黑土 SOC 含量低于防护林带黑土。侯雪莹^[17] 研究表明,G₁ 组和 G₂ 组复合体在复合土壤有机碳方面有重要作用,G₂ 组复合体吸持有机碳的能力最强。本试验数据显示,虽然 G₂ 组含量有所增加,但 G₁ 组的减少量远大于 G₂ 组的增加量,且复合体中 G₁ 组的相对含量远高于 G₂ 组相对含量。因为被淋溶的碳酸钙与土壤腐殖质中的胡敏酸结合,从而使 G₁ 组复合体的含量偏高^[28],受此影响,尽管 G₂ 组含量增加,但耕作黑土的土壤有机碳含量仍出现下降。团聚体的形成和稳定取决于土壤有机质等胶结物质的含量和性质,进一步的研究发现,土壤有机碳和团聚体的形成密切相关,有机碳有利于土壤团聚体的形成,而团聚体又反过来影响有机碳的分解^[29]。经长期连作玉米的土壤有机碳含量明显低于防护林带土壤,也正是长期连作玉米土壤的胶散复合体总量下降程度高于防护林带土壤的原因之一。2 种不同利用方式土壤 G₁ 组含量较 11 年前均出现下降,G₀ 组和 G₂ 组含量均出现增加,水稳复合体(G₁+G₂)含量下降,但防护林带黑土的整体变化量均小于耕作黑土,且防护林带黑土水稳复合体含量整体大于耕作黑土。G₁ 组复合体为钙连接复合体,G₁ 组复合体与土壤交换性钙和碳酸钙呈极显著正相关,且 Ca²⁺ 和 CaCO₃ 在耕作黑土中的含量整体低于防护林带

黑土,这也是导致连作玉米土壤的 G_1 组(钙结合组)和水稳性复合体($G_1 + G_2$)含量显著降低的原因。防护林带土壤经过 11 年时间复合体总量出现略微下降,可能是由于土壤的自然矿化及在土壤微生物的作用下,土壤中难降解的大颗粒物质分解为较小的颗粒的过程中,土壤中部分复合体出现分散。

乔云发等^[15]在中国黑土区北部的长期定位试验中发现,长期施用化肥导致黑土 pH 在 15 年的时间里下降了 0.45 个单位。本研究表明,经过 11 年的时间,相同采样点土壤 pH 出现下降, H^+ 和 Al^{3+} 含量增加, Ca^{2+} 含量下降。长期施肥耕作黑土 pH 下降了 0.76 个单位,下降幅度大于防护林带黑土,且耕作黑土 pH 整体低于防护林带黑土。农作物从土壤中吸收阳离子,收获以后移走籽粒和秸秆导致耕作黑土中盐基离子大量流失,加上人为外源大量施用化肥中的氮肥影响,加剧了耕作黑土酸化的进程。植被生长所需要的养分和自然降雨淋溶对土壤的侵蚀作用,使非耕作黑土的 pH 也出现小幅度下降。

蔡姗姗^[30]研究发现,随着种植年限不断增加,单施化肥土壤 $HA - \Delta \log K$ 值有所下降。本研究表明,耕作黑土 $HA - \Delta \log K$ 均低于同一采样点的防护林带黑土,这说明耕作模式中土壤 HA 随着种植年限的延长和土壤腐殖化过程的增加,其结构趋于复杂化。以上结果说明,耕作施肥和栽培作物促进了 Ca^{2+} 从土壤的移出和有机碳的下降以及胡敏酸的老化,进一步促进了土壤的酸化和胶散复合体稳定性的下降。

徐建民等^[31]研究表明,北方土壤中复合体主要由 G_1 组组成, G_1 组与 pH、CEC、 Ca^{2+} 、 $CaCO_3$ 等都有显著和极显著正相关关系, G_2 组与其均呈显著和极显著负相关。本研究的结果表明,2 种利用方式土壤整体均表现为 $G_1 > G_0 > G_2$, G_1 组的相对含量在 50% 以上,说明 G_1 是黑土土壤胶散复合体的主体。本研究的相关分析表明,pH 与 G_1 组极显著正相关,与 G_2 组极显著负相关;并且 G_1 组与 HA、 Ca^{2+} 和 $CaCO_3$ 呈极显著正相关, G_2 组与其均呈极显著负相关。与徐建民等^[31]的研究结果相符合。进一步通过多元线性回归分析发现, G_1 组和 pH 均受 HA 和 Ca^{2+} 显著影响,且 G_1 组和 pH 与 HA 和 Ca^{2+} 均呈显著正相关关系。由此可见,HA 和 Ca^{2+} 的变化直接影响了胶散复合体 G_1 组和 pH 的变化,即随着 Ca^{2+} 的减少及 HA 的老化胶散复合体 G_1 组数量减少,同时伴随土壤酸化。Barreto 等^[32]研究表明, Ca^{2+} 会通过键桥作用黏结土壤矿物质颗粒和有机碳,从而形成稳定性高的土壤团聚体。Baalousha

等^[33]研究发现, Ca^{2+} 能够通过中和 HA 上的负电荷,通过带负电的腐殖酸分子间形成的键桥而使 HA 的结构更紧凑。综上, Ca^{2+} 和 HA 的变化是影响黑土土壤酸化和土壤团聚体稳定性的主要驱动因素。

有研究^[34]表明,土壤 pH 下降,促进土壤 Ca^{2+} 的淋失,而土壤 Ca^{2+} 的减少进一步促进土壤胶散复合体稳定性的下降。有关腐殖质的组成研究结果均表明,结合态胡敏酸均高于游离态胡敏酸,结合态胡敏酸的数量对胡敏酸的数量起决定作用^[35],而结合态胡敏酸与土壤 pH 呈显著正相关^[36-37],即随着土壤 pH 下降,胡敏酸数量减少。结合本研究相关分析和多元回归的结果, G_1 组和 pH 与 HA 和 Ca^{2+} 均呈显著正相关关系,说明土壤酸化的结果使土壤胶散复合体数量减少,稳定性变差。

4 结论

(1) 经过 11 年的变化,黑土胶散复合体稳定性下降,相比非耕作状态下黑土,耕作模式下的黑土胶散复合体稳定性下降更为严重,胶散复合体总量下降的更多,酸度下降更为明显。

(2) 耕作施肥和栽培作物促进了 Ca^{2+} 从土壤的移出和有机碳的下降以及胡敏酸的老化,进一步促进了土壤的酸化和胶散复合体稳定性的下降。 Ca^{2+} 和 HA 的变化是影响黑土土壤酸化和土壤团聚体稳定性的主要驱动因素。

(3) 土壤酸化的结果使土壤胶散复合体数量减少,稳定性变差。

参考文献:

- [1] Goulding K. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom [J]. *Soil Use Management*, 2016, 32 (3): 390-399.
- [2] Sullivan T J, Lawrence G B, Bailey S W, et al. Effects of acidic deposition and soil acidification on sugar maple trees in the Adirondack Mountains, New York [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(22): 12687-12694.
- [3] Li Q Q, Li S, Xiao Y, et al. Soil acidification and its influencing factors in the purple hilly area of southwest China from 1981 to 2012 [J]. *Catena*, 2019, 175: 278-285.
- [4] Dai Z M, Zhang X J, Tang C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification—A critical review [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 581/582: 601-611.
- [5] Bowman W D, Cleveland C C, Halada L, et al. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 767-770.

- [6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major chinese croplands [J]. *Science*, 2010, 327 (5968):1008-1010.
- [7] 张福锁.我国农田土壤酸化现状及影响[J].*民主与科学*, 2016(6):26-27.
- [8] 熊毅,陈家坊.土壤胶体(第三册)土壤胶体的性质[M].北京:科学出版社,1993:266-270.
- [9] 赵兰坡,邹永久,杨学明.土壤学[M].北京:农业大学出版社,1990:487-513.
- [10] 朱孟龙,赵兰坡,赵兴敏,等.稻草和硫酸铝添加对苏打盐碱土活性有机碳及有机无机复合体的影响[J].*水土保持学报*,2015,29(4):284-288.
- [11] 程程.土壤有机无机复合体研究进展[J].*中国农业信息*,2014(5):99.
- [12] 王聪,王继红,齐静之.吉林玉米带黑土胶散复合体组成特征研究[J].*吉林农业大学学报*,2012,34(3):284-299.
- [13] 傅积平,张敬森.石灰性土壤微团聚体的分组分离及其特性的初步研究[J].*土壤学报*,1963,11(4):382-394.
- [14] 杨彭年.石灰性土壤有机矿质复合体及其团聚性研究[J].*土壤学报*,1984,21(2):144-152.
- [15] 乔云发,苗淑杰,韩晓增,等.不同土地利用方式对黑土农田酸化的影响[J].*农业系统科学与综合研究*,2007,23(4):468-476.
- [16] 王聪,刘艇,李美兰,等.土壤胶散复合体的研究进展[J].*吉林农业科学*,2011,36(1):23-25.
- [17] 侯雪莹.吉林省玉米带黑土有机无机复合土组成及有机碳分布特征[D].长春:吉林农业大学,2006.
- [18] 陈家坊,杨国治.江苏南部几种水稻土的有机—矿质复合体性质的初步研究[J].*土壤学报*,1962,10(2):183-192.
- [19] 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[J].*土壤学报*,2007,44(3):458-466.
- [20] Kyoichi K, Osamu S, Yasuo O, 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.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [22] 刘鸣达,郝旭东,安辉,等.不同稻蟹模式对土壤团聚体腐殖质特征的影响[J].*沈阳农业大学学报*,2012,43(3):306-310.
- [23] 佟玉欣.松嫩平原黑土区种植结构调整对 SOC、土壤 pH 和侵蚀的影响[D].北京:中国农业大学,2018.
- [24] Kong X B, Zhang F R, Wei Q, et al. Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of North China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006,88:85-94.
- [25] 张志丹,罗香丽,王继红,等.吉林省主要土壤胶散复合体粘土矿物 XRD 物相研究[J].*矿物学报*,2016,36(1):97-102.
- [26] 韩晓增,王凤仙,王凤菊,等.长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J].*干旱地区农业研究*,2010,28(1):66-71.
- [27] Guo Y F, Fan R Q, Zhang X P, et al. Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure.[J].*Science of The Total Environment*,2020,703:134617.
- [28] 赵兴敏,刘楠,郭欣欣,等.秸秆和硫酸铝对淡黑钙土有机矿质复合体及有机碳分布的影响[J].*农业环境科学学报*,2017,36(5):950-956.
- [29] 闫靖华,张凤华,谭斌,等.不同恢复年限对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J].*土壤学报*,2013,50(6):1183-1190.
- [30] 蔡姗姗.长期定位施肥对黑土腐殖质组成及结构的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2014.
- [31] 徐建民,袁可能.土壤有机矿质复合体研究[J].*土壤学报*,1993,30(1):43-51.
- [32] Barreto R C, Madari B E, Maddock J E L, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*,2009,132(3):243-251.
- [33] Baalousha M, Motelica-Heino M, Coustumer P L. Conformation and size of humic substances; Effects of major cation concentration and type, pH, salinity, and residence time [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*.2006,272(1/2):48-55.
- [34] 祝艳青.长期定位施肥对保护地土壤钙素形态分布的影响研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2011.
- [35] 刘胜楠,赵兰坡.种稻年限对苏打盐碱土腐殖质含量及组成的影响[J].*吉林农业大学学报*,2018,40(6):707-715.
- [36] 李阳,王继红.长期施肥土壤腐殖质变化及其与土壤酸度变化的关系[J].*南京农业大学学报*,2016,39(1):114-119.
- [37] 李阳,姜海,王继红.耕作黑土土壤腐殖质组成和胡敏酸类型研究[J].*土壤通报*,2016,47(2):360-363.