# 长期施用畜禽粪对黑土有机无机复合体动态变化的影响

孟庆龙，吴景贵，李建明，关华建，季佳鹏，牛岸秋

（吉林农业大学资源与环境学院，长春 130118）

**摘要**：为探究不同畜禽粪长期施用后，对黑土有机无机复合状况及有机碳在土壤有机无机复合体中分布的动态影响，以吉林农业大学教学实验田始于 2010 年的长期定位试验下的黑土作为研究对象。试验共设 4 个处理，分别为施用鸡粪（JF）、施用牛粪（NF）、施用猪粪（ZF）以及对照处理（CK）。土壤样品选取连续施用畜禽粪的第 1 年（2010 年）、第 3 年（2012 年）、第 6 年（2015 年）、第 9 年（2018 年）和第 11 年（2020 年）土壤，测定不同处理下黑土重组有机碳含量、有机无机复合度、胶散复合体含量以及有机碳在各组分复合体中的分布。结果表明：试验初期，外源有机物质对土壤复合状况的影响并不显著，但随着时间的延长，并随着畜禽粪的长期施入，更多的有机无机复合体形成，有机质的积累得到显著提升，其中鸡粪效果最好。到 2020 年使用鸡粪处理下的重组有机碳及原土复合量分别比空白对照提高 12.0％和 10.0％。施用畜禽粪后，各组分胶散复合体含量也高于空白对照，但 $G_1$ 复合体含量呈现下降趋势。从有机碳在各组复合体上的分布来看，畜禽粪长期施用可以增加各组分复合体上分布的有机碳。畜禽粪施入可以改善土壤复合状况，提高复合体及其碳含量，其中以鸡粪还田效果最好。

**关键词**：畜禽粪；黑土；有机无机复合度；有机无机复合体

**中图分类号**：S152.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2022)04-0277-07

**DOI**：10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.034

# Effects of Long-term Application of Livestock and Poultry Manure on the Dynamic Changes of Phaeozem Organic-mineral Complex

MENG Qinglong, WU Jinggui, LI Jianming, GUAN Huajian, JI Jiapeng, NIU Anqiu

(*College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun* 130118)

**Abstract**: The formation of organic-mineral complex in soil can protect organic matter and make it difficult to be decomposed. This study aimed to investigate the dynamic effects of long-term application of different livestock manures on the organic-mineral complex status of phaeozem and the distribution of organic carbon. The phaeozem under a long-term locality experiment started in 2010 at the teaching experimental field of Jilin Agricultural University was used as the research object. Four treatments were set up in the experiment, namely, application of chicken manure, cow manure, pig manure and the control. Soil samples were selected in 2010, 2012, 2015, 2018 and 2020 to determine the content of heavy fraction organic carbon, the degree of organic-mineral complexation, the content of different components of organic-mineral complex. And the distribution of organic carbon in the organic-mineral complex were also determined. The results showed that: At the beginning of the experiment, the effect of exogenous organic matter on soil complex condition was not significant, but with the extension of time and the long-term application of livestock manure, more organic-mineral complexes were formed, and the accumulation of organic matter was significantly enhanced, with the best effect observed in chicken manure treatment. The amount of heavy fraction organic carbon and quantity of organic-mineral complexation under treatment with chicken manure increased by 12.0% and 10.0%, respectively, compared with the control in 2020. After the application of livestock manure, the content of each component gum dispersion complex was also higher than that of the control, however, the content of $G_1$ complex showed a decreasing trend. Long-term application of organic materials increased the distribution of organic carbon in each organic mineral complex. The application of livestock manure could

**收稿日期**：2021-11-30

**资助项目**：吉林省科技厅攻关项目（20190301018NY）；吉林省科技厅重大科技专项（20200501003GX）

**第一作者**：孟庆龙（1996—），男，硕士研究生，主要从事土壤生境调控与农业废弃物资源化研究。E-mail：741252039@qq.com

**通信作者**：吴景贵（1965—），男，博士，教授，主要从事土壤生境调控与农业废弃物资源化研究。E-mail：wujingguiok@163.com

improve the soil complex condition and increase the complex and its carbon content, of which chicken manure was the most effective.

**Keywords**: livestock manures; phaeozem; degree of organic-mineral complexation; organic mineral complex

土壤有机碳是土壤碳的重要组成部分,土壤中有机碳主要以有机质的形式存在,有机质积累和分解的速率决定着土壤碳储量[1]。土壤有机质与土壤矿物是土壤最重要的组成部分,二者密不可分[2],有机物的积累是重要的土壤形成过程[3],而这一过程则需要通过形成有机无机复合体完成。

土壤中有机碳的循环与积累过程主要是有机碳本身的难降解性、土壤无机矿物对有机碳的固定以及团聚体对有机碳的物理保护[4]。土壤无机矿物对有机碳的固定形成有机无机复合体,作为土壤胶体的主要形式,土壤有机无机复合体在土壤良好结构的形成中起到重要作用[5],它一方面提高碳的稳定性,另一方面也提高土壤对养分的固持能力。

在农业生产不断发展的今天,农产品的产量极大增加,伴之而来的是农业生产中的废弃物,大量的家禽和动物粪便得不到及时处理,造成一系列的环境问题[6],同时也造成资源的浪费。农业废弃物的资源化利用已成为许多专家学者研究的重点,但前人[7-8]的研究多集中于有机物料还田后可提升土壤养分,并且改善土壤物理性质。畜禽粪施入后,为土壤带来新的有机质通过有机—矿物结合,形成有机无机复合体,稳定于土壤中[9],但经过长期有机培肥后土壤中有机无机复合体的动态变化却鲜有研究。由于不同畜禽粪自身性质的差异,对土壤有机质含量的影响不尽相同[10],土壤有机质含量又是有机无机复合体形成的重要影响因素,所以不同畜禽粪对土壤有机无机复合体都有着不同影响。有研究[11]表明,土壤有机质的变化与有机肥使用年限密切相关,而通过长期定位试验对土壤进行动态采样观测,可以系统揭示不同畜禽粪对土壤有机质及有机无机复合体动态变化的影响。本文通过长期定位试验,对不同畜禽粪施入黑土后有机无机复合体组成及有机碳在有机无机复合体分布状态的动态变化进行研究,探究不同畜禽粪长期连续施用对黑土有机质复合状况的动态影响,揭示不同畜禽粪在长期有机培肥过程中对黑土有机无机复合体供肥规律及特性的影响,从而为培肥土壤提供理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验区概况

试验地点设在吉林省长春市吉林农业大学教学科研基地进行。研究区年降水量 600 mm,6—8 月的降水总量 350～400 mm,占全年降水的 60%以上。无霜期 145 天。试验为长期定位试验,研究对象为长期施用畜禽粪的黑土,土壤基本理化性质为有机碳含量 19.37 g/kg,全氮含量 1.13 g/kg,全磷含量 0.87 g/kg,全钾含量 2.39 g/kg,土壤 pH 6.67。

## 1.2 试验设计

试验小区分布采取随机排列,每小区宽 8 垄,长 5 m,面积 26 $m^2$,共选取 4 个处理。分别为单施化肥(CK)、猪粪+化肥(ZF)、牛粪+化肥(NF)及鸡粪+化肥(JF)。各小区化肥施用量为磷酸二铵 120 kg/$hm^2$,氯化钾 90 kg/$hm^2$。有机物料按照等碳原则连年施入,其中各畜禽粪施入量为鸡粪 4 931 kg/$hm^2$,猪粪 4 402 kg/$hm^2$,牛粪 3 916 kg/$hm^2$,每个处理设 3 个重复。试验选用的猪粪、牛粪取自吉林农业大学动物科学与技术学院养殖场,鸡粪取自辽源鑫荣生物肥科技有限公司。有机物料基本理化性质见表 1。

**表 1 供试物料基本理化性质**

| 供试材料 | pH | 有机碳/(g·$kg^{-1}$) | 全氮/(g·$kg^{-1}$) | 全磷/(g·$kg^{-1}$) | 全钾/(g·$kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| NF | 7.27 | 302.34 | 13.92 | 3.6 | 8.32 |
| ZF | 7.63 | 268.91 | 21.18 | 7.03 | 8.22 |
| JF | 8.03 | 240.11 | 17.07 | 8.79 | 14.09 |

## 1.3 供试土壤采集与测定

本试验土壤样品选用连续施用畜禽粪的第 1 年(2010 年)、3 年(2012 年)、6 年(2015 年)、9 年(2018 年)、11 年(2020 年)秋收土壤,采用五点法对不同小区的 0—20 cm 土层进行取样,带回实验室自然风干。

在对有机无机复合体的研究中,土壤复合度是通过土壤不同组分的密度不同,将密度相对较高的与矿物结合的土壤腐殖质分离出来。土壤复合状况主要的衡量指标为土壤复合度,土壤复合度可以反映土壤有机质与土壤矿物复合的数量状况,本试验采用密度分组法测定土壤复合度[12],土壤与重液比为 1∶5,重液选用密度为 1.8 的碘化钠,超声分散,离心,采用 $CaCl_2$ 洗涤重组土壤,再用蒸馏水洗至无 $Cl^-$ 反应。随后烘干称重,用重铬酸钾外加热法测定重组有机碳含量(HFOC),从而计算原土复合量(SQC)和原土复合度(SDC)。

胶散分组法是利用化学方法根据有机无机复合体不同的胶散情况,将有机无机复合体进行分组,本研究采用陈家坊等[13]的方法分离,分别提取水质分散组($G_0$)、钠质分散组($G_1$)和超声分散组($G_2$)。烘干称重,计算含量,采用重铬酸钾—外加热法测定各组分胶散复合体有机碳含量。

## 1.4 数据处理

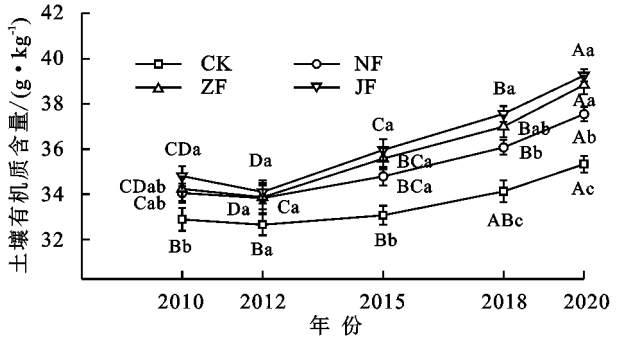
运用 Microsoft Excel 2016、SPSS 18.0 和 Origin

2017 软件对数据进行整理分析及作图。

## 2　结果与分析

### 2.1　长期施用畜禽粪对黑土有机质含量的影响

从图 1 可以看出,各处理土壤有机质含量在畜禽粪施入的前 2 年先出现小幅下降,从 2012 年后随着畜禽粪施用时间的增加出现显著提高。各处理中 CK 处理提升幅度较小。到 2020 年,不同畜禽粪处理中,JF 处理相比 CK 提升最多,达到 11.1%,其次是 ZF 和 NF 处理,增幅为 6.3%～9.9%。




注:不同大写字母表示同一处理在不同年份之间差异性显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一年份不同处理之间差异性显著($p<0.05$)。下同。

**图 1　不同处理对不同时期土壤有机质含量的影响**

### 2.2　长期施用畜禽粪对黑土重组有机碳的影响

从图 2 可以看出,不同畜禽粪的长期施用对不同时期黑土重组有机碳的影响不同。从整体动态变化来看,所有处理均在 2012 年后呈现升高趋势,到 2020 年,所有处理相比 2010 年均有显著提高。不同处理比较来看,到 2020 年,各处理不同时期黑土重组有机碳含量表现为 JF＞ZF＞NF＞CK,畜禽粪处理相比 CK 增加显著,增幅达到 6.8%～12.0%,2020 年不同畜禽粪处理中,JF 与 ZF 处理间没有显著差异,但均比 NF 处理提升显著。

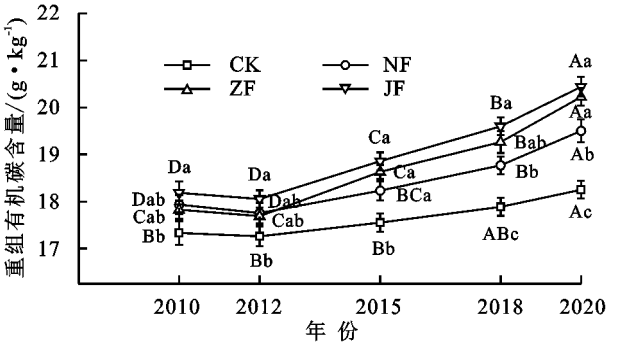



**图 2　不同处理对不同时期重组有机碳含量的影响**

### 2.3　长期施用畜禽粪对黑土原土复合量与原土复合度的影响

从图 3 可以看出,长期施用畜禽粪对不同时期黑土原土复合量的影响不同。从整体动态来看,随着畜禽粪的长期施入,2012 年后黑土原土复合量出现连续显著增高,而 CK 处理变化较小。施用畜禽粪后黑土原土复合量相比 CK 均有提升,提高最多的在 2020 年,JF、ZF 和 NF 处理分别相比 CK 提高 10.0%,9.2%和 5.5%。各畜禽粪之间,JF 处理始终显著高于 NF 处理,2018 年和 2020 年 ZF 处理与 JF 处理无显著差异,但显著高于 NF 处理。

从图 3 还可看出,原土复合度的动态变化相对稳定。从整体时间的动态变化来看,各处理的原土复合度在 2012 年达到最高,随后出现连续下降,到 2020 年与 2010 年相比有显著降低。而在不同年份中 CK 处理高于施入畜禽粪的各个处理,但施入不同畜禽粪,并没有使原土复合度在同一年份中出现显著差异。

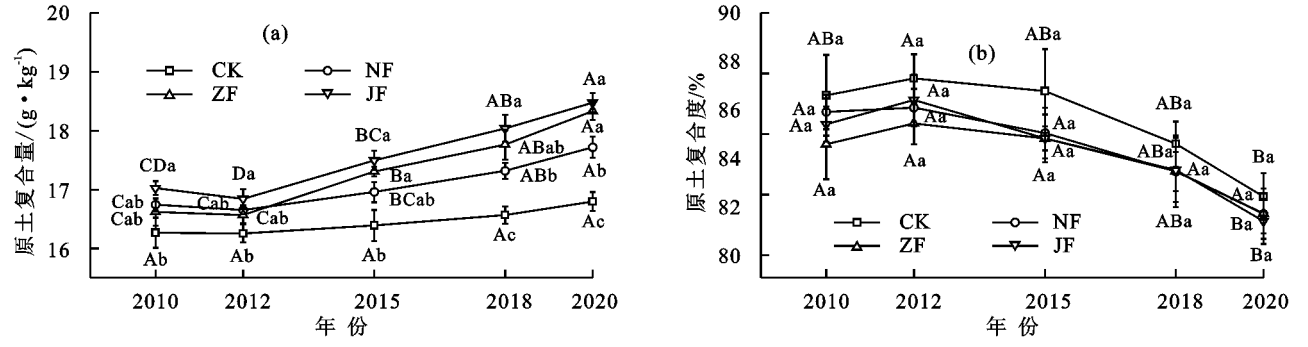



**图 3　不同处理对不同时期土壤原土复合量与复合度的影响**

表 2 为土壤复合度随时间动态变化过程的拟合。通过不同函数拟合发现,原土复合度的动态变化可用二次多项式拟合,CK、NF、ZF 和 JF 处理拟合方程的 $R^2$ 分别为 0.999,0.997,0.992 和 0.968,可以看出,添加畜禽粪所带来的外源有机碳导致各畜禽粪处理拟合方程的 $R^2$ 均小于 CK,且 JF 处理最小,说明 JF 处理对土壤原土复合度影响最大,二次项系数均为负值,大小顺序依次为 CK＜JF＜ZF＜NF,一次项系数最大为 CK,畜禽粪处理中大小顺序依次 ZF＞JF＞NF。常数项均为正数,CK 最大,畜禽粪处理的大小依次为 ZF＜JF＜NF。

### 2.4　长期施用畜禽粪对黑土胶散复合体组成的影响

从表 3 可以看出,不同组分土壤胶散复合体的含量大小始终为 $G_1$＞$G_0$＞$G_2$。从时间动态来看,所有

处理的 $G_0$ 复合体在 2012 年后均有显著提高，而 $G_1$ 复合体整体呈下降趋势，$G_2$ 复合体相对稳定，CK 与 NF 的 $G_2$ 复合体含量在长期试验中无显著差异，JF 与 ZF 处理的 $G_2$ 复合体含量到 2018 年相比 2010 年有显著提升。水稳性复合体（$G_1+G_2$）的总含量与 $G_1$ 含量变化相似，整体呈连续下降趋势。复合体总含量的动态变化中，经过长期添加畜禽粪后，相比 2010 年均呈现显著提高，到 2020 年 JF 处理复合体总含量最高，大小依次为 JF＞ZF＞NF＞CK。

**表 2 土壤原土复合度($y$)随时间($x$)动态变化过程拟合**

| 处理 | 拟合方程 | $R^2$ |
|---|---|---|
| CK | $y=-0.071x^2+0.501x+84.924$ | 0.999 |
| NF | $y=-0.044x^2+0.186x+84.626$ | 0.997 |
| ZF | $y=-0.051x^2+0.364x+83.554$ | 0.992 |
| JF | $y=-0.056x^2+0.340x+84.149$ | 0.968 |

施用畜禽粪的处理始终相比 CK 处理 $G_0$ 复合体含量显著提高，2020 年 JF 处理相比 CK 增加最多，达到 13.8%，ZF 与 NF 处理分别比 CK 增加 11.8% 和 8.8%。从畜禽粪处理来看，除 2015 年相互无显著差异外，均为 JF 处理 $G_0$ 含量最高，并始终显著高于 NF 处理。$G_1$ 复合体相对稳定，只在 2015 年和 2018 年施用畜禽粪的处理 $G_1$ 含量高于 CK，JF 处理分别比 CK 高出 3.3% 和 1.5%，ZF 处理分别比 CK 高出 2.9% 和 2.6%。NF 处理分别比 CK 高出 1.4% 和 3.0%；畜禽粪的不同并未使各处理间土壤 $G_1$ 复合体含量出现显著差异。$G_2$ 复合体同样是稳定的复合体，只有 JF 和 ZF 处理到 2018 年与 2020 年相比 CK 有显著提高，NF 处理在 2018 和 2020 年相比 CK 有增加，但差异未达到显著水平。2020 年 JF 和 ZF 处理分别相比 CK 提高 12.8% 和 9.1%；畜禽粪各处理之间同样没有显著差异，只在 2015 年后，JF、ZF 处理相比 NF 处理有升高，但差异不显著。

不同复合体组成的动态变化中，由于 $G_0$ 复合体含量整体呈上升趋势，所以 $G_0$ 复合体占比出现同样的趋势，所有处理的 $G_0$ 复合体在 2020 年占比最高，不同畜禽粪处理中，2010 年与 2012 年大小顺序均为 JF＞ZF＞NF，2015 年不同畜禽粪之间无显著差异，2018 年以 ZF 处理最高，2020 年同样不同畜禽粪之间无显著差异。$G_1$ 复合体含量呈下降趋势，其占比同样呈现连年下降趋势，所有处理均在 2020 年占比最低，JF 与 ZF 处理除 2010 年外无显著差异，而 NF 处理在 2012 年与 2018 年显著高于 JF 与 ZF 处理。$G_2$ 复合体含量最少，其占比受 $G_1$ 和 $G_0$ 含量影响较大，但 JF 和 ZF 处理的 $G_2$ 复合体占比在 2020 年相比 2010 年显著提高。在不同年份中，畜禽粪的不同并未造成 $G_2$ 复合体占比的不同，各畜禽粪处理间无显著差异。

**表 3 不同处理对不同时期土壤有机无机复合体组成的影响**

| 年份 | 处理 | 复合体组成/% | | | 复合体含量/(g·kg$^{-1}$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $G_0$ | $G_1$ | $G_2$ | $G_0$ | $G_1$ | $G_2$ | $G_0+G_1+G_2$ | $G_1+G_2$ |
| 2010 | CK | 26.05±0.37Dc | 70.57±0.41Aa | 3.38±0.06Aa | 142.71±1.28Ec | 386.58±4.50Aa | 18.51±0.28Aa | 547.79±3.43Bc | 405.08±4.42Ab |
| | NF | 27.75±0.32Eb | 68.99±0.37Ab | 3.25±0.05Aab | 158.81±1.57Db | 394.77±4.41Aa | 18.61±0.25Aa | 572.19±4.30Ab | 413.38±4.32Aab |
| | ZF | 28.22±0.42Db | 68.57±0.41Ab | 3.20±0.02Bb | 163.83±1.73Db | 398.09±4.38Aa | 18.60±0.15Ba | 580.52±3.01Bb | 416.69±4.48Aab |
| | JF | 29.72±0.31Ea | 67.10±0.45Ac | 3.17±0.06Bb | 177.45±2.54Da | 400.60±3.06Aa | 18.93±0.28Ba | 596.98±4.35Aa | 419.53±3.08Aa |
| 2012 | CK | 27.95±0.32Cd | 68.57±0.39Ba | 3.49±0.11Aa | 150.04±1.95Dd | 368.15±2.97Ba | 18.71±0.67Aa | 536.90±3.59Cc | 386.87±3.20Ba |
| | NF | 28.88±0.29Dc | 67.62±0.54Ba | 3.49±0.08Aa | 158.16±0.91Dc | 370.33±3.47Ba | 19.13±0.45Aa | 547.62±3.00Cbc | 389.46±3.60Ba |
| | ZF | 30.22±0.22Cb | 66.32±0.41Bb | 3.45±0.08ABa | 167.37±1.68Db | 367.27±2.41Ba | 19.11±0.37Ba | 553.74±2.89Cb | 386.38±2.04Ba |
| | JF | 31.41±0.30Da | 65.26±0.0.39Bb | 3.32±0.11ABa | 178.28±2.44Da | 370.36±3.30Ba | 18.88±0.75Ba | 567.52±4.95Ca | 389.24±3.62Ba |
| 2015 | CK | 30.78±0.46Bb | 65.80±0.39Ca | 3.42±0.10Aa | 169.75±2.77Cb | 362.93±2.79Bb | 18.86±0.63Aa | 551.54±3.44Bb | 381.79±3.41Bb |
| | NF | 33.56±0.34Ca | 63.16±0.36Cb | 3.28±0.06Aa | 195.60±2.00Ca | 368.14±3.23Bab | 19.11±0.46Aa | 582.85±3.48ABa | 387.25±3.46Bab |
| | ZF | 32.54±0.21Ba | 64.19±0.32BCb | 3.27±0.11ABa | 189.21±1.20Ca | 373.29±2.93Ba | 19.02±0.69Ba | 581.52±2.85Ba | 392.31±2.67Bab |
| | JF | 32.59±0.32Ca | 64.15±0.36Cb | 3.26±0.08Ba | 190.43±2.32Ca | 374.90±2.82Ba | 19.06±0.60Ba | 584.39±3.86Ba | 393.96±3.16Ba |
| 2018 | CK | 35.43±0.35Ab | 61.14±0.39Da | 3.43±0.05Aa | 197.25±1.30Bc | 340.36±3.44Cb | 19.12±0.18Ab | 556.73±2.18Bc | 359.48±3.26Cb |
| | NF | 35.47±0.39Bb | 61.08±0.37Da | 3.45±0.07Aa | 203.63±2.88Bb | 350.65±2.47Ca | 19.80±0.31Aab | 574.08±3.34Bb | 370.45±2.51Ca |
| | ZF | 37.03±0.25Aa | 59.47±0.32Db | 3.50±0.07Aa | 217.52±1.59Ba | 349.31±2.83Cab | 20.55±0.39Aa | 587.38±2.73Bab | 369.86±2.50Ca |
| | JF | 36.97±0.31Ba | 59.46±0.33Db | 3.57±0.06Aa | 214.87±1.30Ba | 345.59±2.95Cab | 20.76±0.42Aa | 581.23±2.34Ba | 366.36±3.01Cab |
| 2020 | CK | 35.50±0.31Ab | 61.13±0.37Da | 3.36±0.07Aa | 203.50±2.19Ac | 350.41±2.43Ca | 19.27±0.46Ab | 573.18±2.98Ac | 369.69±2.40Ca |
| | NF | 37.30±0.21Aa | 59.31±0.31Eb | 3.39±0.10Aa | 221.49±1.75Ab | 352.12±2.55Ca | 20.13±0.67Aab | 593.75±3.34Ab | 372.26±2.47Ca |
| | ZF | 37.83±0.28Aa | 58.68±0.34Db | 3.50±0.08Aa | 227.47±2.64Aab | 352.85±3.03Ca | 21.02±0.43Aa | 601.34±4.28Aab | 373.87±2.70Ca |
| | JF | 38.15±0.35Aa | 58.27±0.34Eb | 3.58±0.06Aa | 231.65±2.03Aa | 353.84±3.16Ca | 21.73±0.29Aa | 607.23±2.72Aa | 375.57±3.14Ca |

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同大写字母表示同一处理在不同年份间差异显著（$p<0.05$）；不同小写字母表示同一年份不同处理间差异显著（$p<0.05$）。

### 2.5　长期施用畜禽粪对黑土各组分胶散复合体中有机碳分布的影响

胶散复合体的含量虽然只有 53.6%～60.7%,但其中的有机碳却占到土壤有机碳的 72.73%～77.90%。从各组复合体的有机碳含量上,3 组胶散复合体的有机碳含量大小依次为 $G_2>G_1>G_0$,但在有机碳的分布上由于不同复合体含量存在差异,3 组复合体的碳分布按大小依次为 $G_1>G_0>G_2$。

由图 4 可知,随着长期试验的进行,除 $G_1$ 复合体外,分布在 $G_0$ 和 $G_2$ 复合体中的有机碳均在长期试验后出现显著增加。从各处理之间的比较来看,$G_0$ 复合体中分布的有机碳除 2018 年 NF 处理与 CK 无显著差异外,施用畜禽粪处理均显著高于 CK,到 2020 年 JF 处理相比 CK 增加最多,增幅达到 17.9%,其次是 ZF 与 NF 处理,分别相比 CK 增加 14.5%和 10.4%。不同畜禽粪之间,除 2015 年各畜禽粪处理之间没有显著差异,其他年份 JF 处理均显著高于 NF 处理,而 ZF 处理只在 2018 年相比 NF 处理的增加达到显著水平。$G_1$ 复合体的有机碳含量虽有上升,但由于 $G_1$ 复合体含量降低,分布于 $G_1$ 的有机碳并未随畜禽粪施入出现连续显著增加;不同处理间,除 2012 年所有处理无显著差异外,施用畜禽粪的处理相比 CK 均有提升,但只有 JF 处理在其他年份中相比 CK 的增加始终达到显著水平,JF 处理在 2020 年相比 CK 增加 5.3%,ZF 与 NF 处理在 2020 中相比 CK 有增加但不显著,分别增加 3.7%和 2.5%;畜禽粪处理之间对比,2012 年与 2018 年各畜禽粪之间没有显著差异,其他年份 JF 处理含量最高,但相比其他畜禽粪处理的增加未达到显著水平。$G_2$ 复合体相对稳定,其有机碳分布整体呈现上升趋势,但不同处理间只有 JF 处理相比 CK 在所有年份中的增加达到显著水平,2020 年增幅最大,达到 17.4%,ZF 处理在 2012 年、2018 年和 2020 年相比 CK 有显著增加,同样在 2020 年相比 CK 增加最多,增幅为 12.3%,NF 处理在 2018 年和 2020 年相比 CK 有显著提高,而 2020 年相比 CK 处理,增幅只有 6.3%。不同畜禽粪处理之间表现为 JF>ZF>NF,JF 处理在 2010 年和 2018 年相比其他畜禽粪处理达到显著水平,其他年份有增加,但差异不显著。

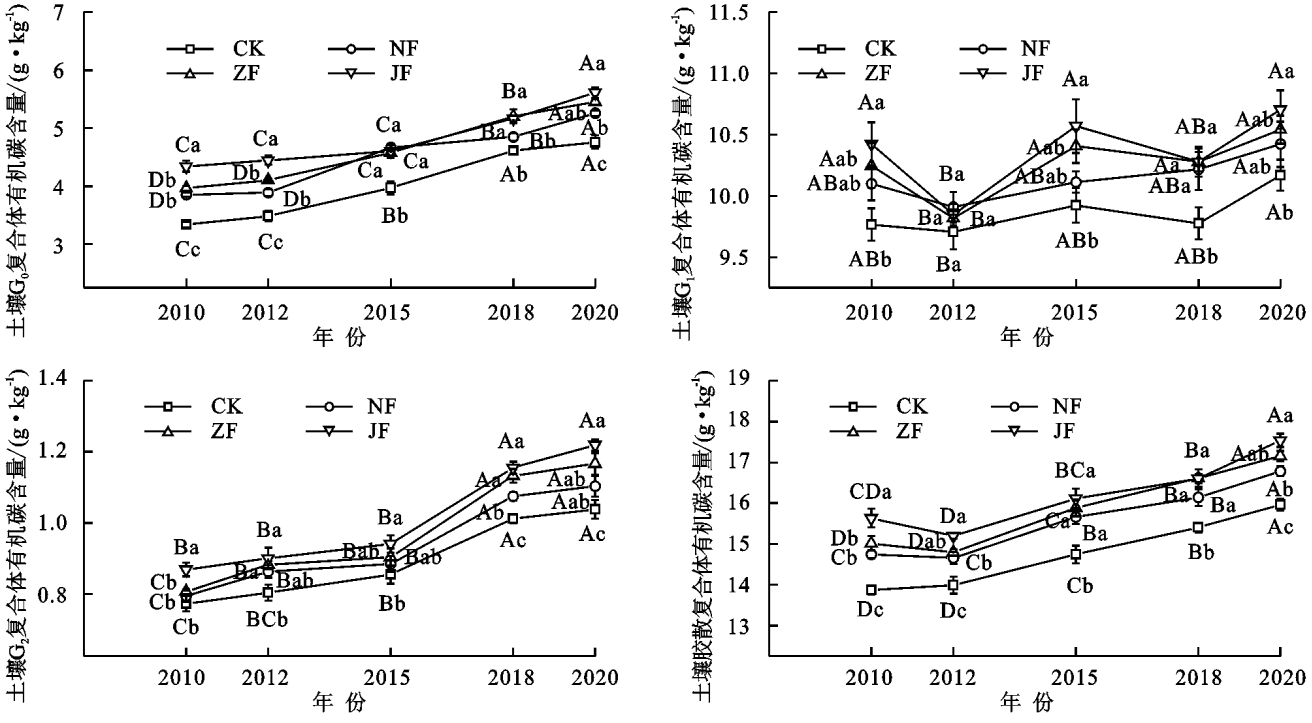



图 4　不同处理对不同时期土壤中胶散复合体有机碳含量的影响

不同年份的动态变化之间胶散复合体有机碳总量不同。所有处理从 2012 年开始出现显著提升,2020 年达到最高,各年份中的添加畜禽粪处理均高于 CK,2020 年 JF、ZF 和 NF 处理分别相比 CK 提高 9.8%,7.5%和 5.1%。畜禽粪处理之间除 2015 年和 2018 年没有显著差异,其他均是 JF 处理含量最高,NF 与 ZF 处理在长期试验中无显著差异。

## 3　讨　论

土壤有机质在维持土壤肥力中有着不可替代的作用,在生产中施用有机物料,尤其是有机物料配施化肥能提高土壤有机质的含量,本文从土壤复合度和土壤胶散复合体 2 个方面对不同畜禽粪长期施用条件下黑土有机无机复合体的动态影响进行研究。

在本文的研究结果中存在 1 个现象,不论是土壤

有机质、原土复合量，还是胶散复合体中有机碳的含量，试验的前期提升缓慢，甚至出现下降。王莉等[14]的研究指出，大豆连续种植 3 年与第 1 年种植相比，土壤腐殖质活化部分更多，紧结态腐殖质向松稳二态转移，土壤肥力减弱；也有研究[15]认为，外源有机物料的加入会刺激土壤微生物产生更多的分解酶，产生激发效应。本研究结果与上述研究结果相符，试验之初土壤中水稳性复合体($G_1+G_2$)的含量、土壤有机碳含量与土壤重组有机碳含量均有所下降。但从土壤复合度来看，2012 年的土壤复合度并未出现下降，说明损失的有机碳中，不稳定的轻组有机碳占比更大，随着畜禽粪的长期施用，以及长期定位试验中作物根茬还田，土壤中的有机质得到补充，形成有机无机复合体稳定在土壤中，有机质累积的量也重新大于分解量，且伴随着常年有机物料的添加，这种现象出现得更早，有机质稳定的量更多。

从土壤整体复合状况来看，施用畜禽粪后土壤中的重组有机碳与原土复合量均高于未施畜禽粪的 CK 处理，说明畜禽粪的施入可以改善土壤中碳的稳定性，这也与前人[16]的研究结果相一致。2012 年后，重组有机碳与原土复合量随施用有机物料的年限增加而增加，这与史吉平等[17]的研究结果相符，可能是由于长期施用的有机物料向土壤补充有机质，这些新增的有机质在土壤中长期积累，与土壤矿物质结合，使得土壤中稳定的重组有机碳含量与原土复合量增加，这也说明 2012 年后新加入的有机质大于土壤中分解流失的有机质，使得土壤有机质处于积累状态[18]。原土复合度与重组有机碳和原土复合量的变化趋势相反，其原因为畜禽粪的施入，为土壤带来更多处于游离状态的轻组有机碳，使得重组有机碳的占比降低，导致原土复合度降低[19]。

目前，土壤胶散复合体的研究方法一般将胶散复合体分成 $G_0$(水分散组)、$G_1$(钠分散组)和 $G_2$(超声分散组)3 个组分，以往对 3 组复合体含量的研究结果[17]显示，添加有机物料可以提高各组分的复合体含量，而本研究结果也显示，同一年份中，添加畜禽粪处理的复合体含量显著高于 CK 处理。本文的研究结果还显示，随着畜禽粪的长期施用，$G_2$复合体和 $G_0$复合体含量均显著增加，但 $G_1$复合体在长期试验期间出现连续下降。在丁慧仪等[20]对长期耕作黑土中胶散复合体的研究中也发现，$G_1$复合体随时间增加，出现减小情况，该研究通过分析指出，这一现象可能是长期的耕作和施肥导致土壤钙离子淋失，从而使土壤复合体稳定性下降。陈恩凤等[21]的研究也指出，随着开垦年限的增加，土壤中 $G_0$复合体含量也随之增加，这也是即使 $G_1$复合体含量下降，但土壤胶散复合体总量没有下降的原因。

从有机碳在各组复合体的分布来看，在 2012 年以后，随着畜禽粪的连续施用，各组分复合体中分布的有机碳相比单施化肥有显著提高，这与前面的重组有机碳和原土复合量的变化规律一致，说明长期施用畜禽粪可以使土壤中有更多有机质形成有机无机复合体，从而稳定下来。Das 等[22]研究发现，长期施肥，尤其是有机肥与无机肥配施，可以改变土壤的碳稳定性，与本文结论相符。

本研究所用的畜禽粪之中，JF(鸡粪)处理无论是对土壤复合体含量还是碳含量的提升都起到显著作用，其次是 ZF(猪粪)处理，这与以往对不同畜禽粪还田效果的研究成果一致。王笃超等[23]对不同畜禽粪还田的研究中也发现，鸡粪对土壤的有机碳提升最为明显。究其原因，有研究[24]指出，不同畜禽粪本身的性质也决定其还田效果，有机物料本身的碳氮比也决定该有机物料的腐解速率；再者鸡粪与猪粪碳氮比较低，按照等碳量还田后，给土壤带来更多养分，促进作物生长，长期施用造成根茬还田量不同，导致土壤中有机质储量的不同。本试验用到的畜禽粪中，即以 NF(牛粪)处理的碳氮比最高，而 JF(鸡粪)和 ZF(猪粪)处理的碳氮比均远小于 NF(牛粪)处理。有机质是有机无机复合体重要的影响因素，有机质储量的变化会导致有机无机复合体出现差异。而牛粪属于冷性肥料，鸡粪猪粪属于热性肥料，本身性质的差异可能也导致其分解时土壤微生物活性的不同[25]。不同畜禽粪带来的养分不同，使得土壤微生物活性与代谢产物存在差异，所以随着微生物活动增强，代谢分泌物增多，也使得土壤有机碳积累增加[26]。

## 4 结 论

(1)长期定位试验初期，土壤中有机无机复合体含量及其碳含量增长缓慢，甚至有所降低，但随着试验的长期进行，土壤进行有机质积累，有机质开始更多地形成有机无机复合体，黑土有机无机复合体含量及其碳含量均出现显著增加。

(2)畜禽粪长期施入，相比单施化肥，可以显著增加土壤的重组有机碳与土壤原土复合量，畜禽粪处理中以鸡粪处理效果最好，而土壤原土复合度则与其他指标相反，经过长期试验后出现显著降低，畜禽粪处理的原土复合度低于单施化肥处理。

(3)$G_1$胶散复合体含量随试验时间增加而减少，而 $G_0$与 $G_2$则在长期施用畜禽粪后得到提升，这也导

致土壤中胶散复合体总量经过长期施用畜禽粪后得到显著提高,各处理表现为 JF>ZF>NF>CK。

(4)施入畜禽粪后,新的有机质结合到有机无机复合体中,使得分布在各组分复合体的有机碳得到显著增加,所有处理中,鸡粪的提升效果最为明显。

**参考文献:**


[1] 王艳丽,字洪标,程瑞希,等.青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J].生态学报,2019,39(11):4096-4105.

[2] 王磊,应蓉蓉,石佳奇,等.土壤矿物对有机质的吸附与固定机制研究进展[J].土壤学报,2017,54(4):805-818.

[3] Kögel K I, Amelung W. Soil organic matter in major pedogenic soil groups[J].Geoderma,2021,384:e114785.

[4] 毛霞丽.亚热带不同母质发育土壤有机碳的积累特征及其稳定机理研究[D].杭州:浙江大学,2020.

[5] 李少博,徐英德,高晓丹,等.离子界面行为在土壤有机无机复合体形成中的作用[J].中国生态农业学报,2018,26(11):1682-1691.

[6] Wang B, Dong F Q, Chen M J, et al. Advances in recycling and utilization of agricultural wastes in China: Based on environmental risk, crucial pathways, influencing factors, policy mechanism[J]. Procedia Environmental Sciences,2016,31:12-17.

[7] Mi W H, Sun Y, Xia S Q, et al. Effect of inorganic fertilizers with organic amendments on soil chemical properties and rice yield in a low-productivity paddy soil[J]. Geoderma,2018,320:23-29.

[8] 何瑞成,吴景贵,李建明.不同有机物料对原生盐碱地水稳性团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):310-316.

[9] Kopittke P M, Dalal R C, Hoeschen C, et al. Soil organic matter is stabilized by organo-mineral associations through two key processes: The role of the carbon to nitrogen ratio[J].Geoderma,2020,357:e113974.

[10] 王静,王磊,刘耀斌,等.长期施用不同有机肥对甘薯产量和土壤生物性状的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):184-192.

[11] 唐继伟,徐久凯,温延臣,等.长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(11):1827-1834.

[12] 韩玮,申双和,谢祖彬,等.生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响[J].生态学报,2016,36(18):5838-5846.

[13] 陈家坊,楊国治.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.

[14] 王莉,吴景贵,张志莹,等.大豆重茬对黑土团聚体及腐殖质结合形态的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):238-242.

[15] 曹彬彬.秸秆与外源物料配施对土壤激发效应及碳固持的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.

[16] 陈晓东,吴景贵,范围,等.有机物料对原生盐碱土微团聚体特征及稳定性的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):201-207.

[17] 史吉平,张夫道,林葆.长期定位施肥对土壤有机无机复合状况的影响[J].植物营养与肥料学报,2002,8(2):131-136.

[18] 高福丽,夏建国.不同种植年限茶园土壤有机无机复合状况及有机碳分布特征[J].水土保持学报,2009,23(1):50-53,72.

[19] 俞巧钢,杨艳,邹平,等.有机物料对稻田土壤团聚体及有机碳分布的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):170-175.

[20] 丁慧仪,王淑华,王继红.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[J].水土保持学报,2020,34(5):369-376.

[21] 陈恩凤,周礼恺,邱凤琼,等.土壤肥力实质的研究:Ⅰ.黑土[J].土壤学报,1984,21(3):229-237.

[22] Das R, Purakayasatha T J, Das D, et al. Long-term fertilization and manuring with different organics alter stability of carbon in colloidal organo-mineral fraction in soils of varying clay mineralogy[J]. Science of the Total Environment,2019,684:682-693.

[23] 王笃超,吴景贵,李建明.不同有机物料对连作大豆土壤养分含量及生物性状的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):258-262,270.

[24] 俄胜哲,时小娟,车宗贤,等.有机物料对灌漠土结合态腐殖质及其组分的影响[J].土壤学报,2019,56(6):1436-1448.

[25] 魏宇轩,蔡红光,张秀芝,等.不同种类有机肥施用对黑土团聚体有机碳及腐殖质组成的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):258-263.

[26] 武均,蔡立群,张仁陟,等.耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(5):728-736.