

鸡粪与化肥配施对饲用小黑麦/玉米轮作土壤团聚体分形特征与碳库管理指数的影响

蔺芳, 邢晶鑫, 任思敏, 张家洋

(新乡学院生命科学技术学院, 河南 新乡 453000)

摘要: 为探讨鸡粪与化肥配施对饲用小黑麦/玉米轮作土壤水稳性团聚体分形特征及碳库管理指数的影响, 通过 2010—2017 年连续 8 年大田试验, 研究了 C_0N_0 (不施肥, CK)、 C_0N_{10} (鸡粪氮: 尿素氮=0:10)、 C_2N_8 (鸡粪氮: 尿素氮=2:8)、 C_4N_6 (鸡粪氮: 尿素氮=4:6) 和 C_5N_5 (鸡粪氮: 尿素氮=5:5) 5 种不同处理对小黑麦/玉米轮作土壤水稳性团聚体组成及对土壤有机碳 (SOC)、总有机碳 (TOC)、活性有机碳 (AOC)、土壤质量分形维数 (D_m) 和碳库管理指数 (CPMI) 的影响。结果表明: 不同施肥处理对小黑麦/玉米轮作土壤水稳性团聚体组成具有显著影响。0—40 cm 土层水稳性团聚体组成均以 <0.25 mm 粒径为主, 其含量表现为 C_0N_0 处理最高, C_0N_{10} 、 C_2N_8 和 C_5N_5 处理次之, C_4N_6 处理最低; 与 CK 相比, 各处理的团聚体 SOC 含量均显著增加 ($p < 0.05$), 增加幅度由大到小依次为 $C_4N_6 > C_5N_5 > C_2N_8 > C_0N_{10}$, 且 C_4N_6 处理明显高于其他处理 ($p < 0.05$); 不同施肥处理下土壤水稳性团聚体 D_m 大小排序为 $C_0N_0 > C_0N_{10} > C_2N_8 > C_5N_5 > C_4N_6$; 不同施肥处理下 TOC、AOC 和 CPMI 含量大小顺序为 $C_4N_6 > C_5N_5 > C_2N_8 > C_0N_{10} > C_0N_0$, 且同一处理下 TOC、AOC 和 CPMI 含量均随着土层的加深而逐渐降低; Pearson 相关性分析表明, D_m 与 TOC、AOC 和 CPMI 和团聚体 SOC 基本呈极显著负相关 ($p < 0.01$), 而 CPMI 与 TOC、AOC 和团聚体 SOC 则基本呈极显著正相关 ($p < 0.01$)。综合分析认为, 在小黑麦/玉米轮作体系中鸡粪配施化肥不仅有利于提高土壤团聚体稳定性, 还增强了土壤肥力, 其中 C_4N_6 施肥处理效果最佳。

关键词: 小黑麦/玉米轮作; 鸡粪; 化肥; 分形维数; 碳库管理指数

中图分类号: S451 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)05-0183-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.030

Effect of Combined Application of Chicken Manure with Fertilizer on Soil Aggregate Fractal Characteristics and Soil Carbon Pool Management Index in Triticale/Maize Rotation System

LIN Fang, XING Jingxin, REN Simin, ZHANG Jiayang

(Xinxiang College of Life Science and Technology, Xinxiang, Henan 453000)

Abstract: To investigate the effects of different proportions of chicken manure and nitrogen fertilizer on the fractal characteristics of soil water stable aggregates and the carbon pool management index in the forage triticale/maize rotation, a field experiment was conducted from 2010 to 2017 (successive eight years) with five treatments: C_0N_0 (no fertilizer, CK), C_0N_{10} (chicken manure nitrogen : urea nitrogen=0:10), C_2N_8 (chicken manure nitrogen : urea nitrogen=2:8), C_4N_6 (chicken manure nitrogen : urea nitrogen=4:6), C_5N_5 (chicken manure nitrogen : urea nitrogen=5:5). Soil water stable aggregate composition and organic carbon (SOC), total organic carbon (TOC), active organic carbon (AOC), soil mass fractal dimension (D_m) and soil carbon management index (CPMI) were assayed in triticale/maize rotation. The results showed that different fertilization measures had significant influence on the composition of soil water stable aggregates in triticale/maize rotation. The soil water stable aggregate composition was less than 0.25 mm particle size, its content was the highest in C_0N_0 treatment, followed by C_0N_{10} , C_2N_8 and C_5N_5 treatments, and C_4N_6 treatment was the lowest. Compared with CK, aggregate SOC content of each treatment were significantly increased ($p < 0.05$), and the increase order from large to small was $C_4N_6 > C_5N_5 > C_2N_8 > C_0N_{10}$, and

收稿日期: 2018-04-17

资助项目: 河南省科技攻关项目 (172102110192, 162102310250); 河南省高等学校重点科研项目 (16A180034)

第一作者: 蔺芳 (1983—), 女, 河南新乡人, 讲师, 主要从事草地生物多样性及土壤修复研究。E-mail: fanglin2035@126.com

通信作者: 蔺芳 (1983—), 女, 河南新乡人, 讲师, 主要从事草地生物多样性及土壤修复研究。E-mail: fanglin2035@126.com

SOC of C_4N_6 treatment was significantly higher than those of other treatments ($p < 0.05$), the D_m of soil water stable aggregates from large to small was $C_0N_0 > C_0N_{10} > C_2N_8 > C_5N_5 > C_4N_6$. Soil TOC, AOC and CPMI of each treatment in order was $C_4N_6 > C_5N_5 > C_2N_8 > C_0N_{10} > C_0N_0$, and the AOC, CPMI and TOC contents of the same treatment decreased gradually with the increasing soil depth. The pearson correlation analysis showed that D_m had a very significant negative correlation with TOC, AOC and aggregate SOC ($p < 0.01$), and CPMI was significantly positively correlated with TOC, AOC and aggregate SOC ($p < 0.01$). Comprehensively, the combined application of chicken manure with nitrogen fertilizer was not only beneficial to improving the stability of the soil structure, but also to enhancing soil fertility in triticale/maize rotation system, which C_4N_6 was the best treatment.

Keywords: triticale/maize rotation; chicken manure; fertilizer; fractal dimension; carbon pool management index

饲用小黑麦(*Triticale*)兼具了小麦和黑麦的优良特性,以高营养品质、抗逆性强等优点成为目前畜牧业发展的新型饲草^[1]。饲用玉米(*Zea mays*)因其生物产量高、适应性广而成为我国“粮改饲”的主推饲草品种^[2],二者作为豫北地区近年来普遍种植的战略牲保障饲草,能有效满足快速发展的畜牧业生产对高产优质饲草的需求。目前在该区饲用小黑麦/玉米轮作的种植中,施肥的盲目性仍然普遍存在,这不但造成肥料的严重浪费,而且还对土壤生态环境构成了潜在威胁,严重制约了饲草产量与品质的提高。因此,为了使农田土壤得到可持续利用,探讨饲用小黑麦/玉米的合理施肥具有十分重要的意义。

土壤水稳性团聚体和有机碳作为重要的土壤属性,二者密不可分,前者是后者存在的场所,后者是前者形成所需的重要胶结物质^[3]。其中,土壤水稳性团聚体作为土壤团粒结构的重要表征形式,其组成和稳定性直接影响了土壤的许多理化性质^[4]。土壤总有机碳即有机质中的总碳含量,由于其主要成分活性有机碳对外界环境变化十分灵敏,因此常用基于活性有机碳计算得到的土壤碳库管理指数来全面反映土壤碳库的动态变化^[5]。此外,由于土壤是一种具有分形

特征的多孔介质^[6],因而近年来国内外许多学者将 Tyler 等^[7]提出的分形理论广泛应用到土壤领域,根据计算得出的团聚体分形维数来定量描述土壤结构特征。已有研究^[8]表明,土壤团聚体分形维数和碳库管理指数是反映土壤质量或健康的重要指标,对评价土壤结构与肥力状况具有重要意义。近年来许多学者针对鸡粪等有机肥与化肥配施开展了大量研究,但应用于饲用小黑麦/玉米轮作的研究鲜有报道,尤其是关于饲用小黑麦/玉米轮作土壤团聚体的分形特征和土壤碳库的相关研究尚未见报道。为此,本文探讨了豫北地区鸡粪与化肥配施对饲用小黑麦/玉米轮作土壤团聚体分形特征与碳库管理指数的影响,旨在为该地区饲用小黑麦/玉米种植的合理施肥和土壤资源的可持续利用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于河南省新乡市红旗区原堤村(35.26° N, 113.97° E),属暖温带大陆性季风气候,年均气温 14.2℃,年均降水量 573.4 mm,年均日照时间 2 400 h,年均湿度 68.0%,无霜期 220 d。降雨年际间分配不均,主要集中在 7—8 月。供试土壤理化性质见表 1。

表 1 试验地 0—40 cm 土层土壤理化性质

土壤类别	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	持水量/ %	pH
砂壤土	1.06	0.67	13.05	30.16	12.24	85.74	8.86	28.54	8.04

1.2 试验设计

2010—2017 年连续 8 年对小黑麦/玉米进行大田轮作种植(一年两熟制),设 5 种处理,分别为: C_0N_0 (CK),不施任何肥料; C_0N_{10} (鸡粪氮:尿素氮=0:10); C_2N_8 (鸡粪氮:尿素氮=2:8); C_4N_6 (鸡粪氮:尿素氮=4:6); C_5N_5 (鸡粪氮:尿素氮=5:5)。随机区组设计,每种处理重复 3 次,共 15 个小区,小区面积 20 m²(4 m×5 m)。小黑麦和玉米品种分别为中饲 1048 和 KD—3,均为饲用型,分别购自北京克劳

沃草业有限公司和河南省农科院。小黑麦于每年的 10 月初播种,条播,行距 25 cm,播量为 300 kg/hm²,次年 5 月中旬刈割(抽穗期)。玉米于每年的 5 月底播种,株、行距为 40,60 cm,播种密度为 41 687 株/hm²,当年 9 月底刈割(乳熟期)。

肥料及其施用量如下(参考当地):氮肥为尿素(N 46%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12%),钾肥为硫酸钾(K₂O 50%),鸡粪取自当地养鸡场(N 1.62%),其具体用量以 N 含量为标准进行折算。全年鸡粪和氮

肥的加和为 450 kg/hm² (均以 N 计), 磷肥 150 kg/hm² (以 P₂O₅ 计), 钾肥 150 kg/hm² (以 K₂O 计), 基施和追施氮肥的比例为 1 : 1, 小黑麦季和玉米季尿

素氮的施用比例相当(1 : 1)。全年的鸡粪、磷肥、钾肥在小黑麦播种前一次性施入。试验期间定期除草, 浇水。肥料具体施用量见表 2。

表 2 各处理肥料用量

单位: kg/hm²

处理	小黑麦季					玉米季		全年		
	播种前				拔节期	播种前	大喇叭口期	肥料用量		
	鸡粪	化肥			N	化肥				
		(N)	N	P ₂ O ₅		K ₂ O	N	N	N	P ₂ O ₅
C ₀ N ₀	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C ₀ N ₁₀	0	112.50	120	90	112.50	112.50	112.50	450	120	90
C ₂ N ₈	90	90.00	120	90	90.00	90.00	90.00	450	120	90
C ₄ N ₆	180	67.50	120	90	67.50	67.50	67.50	450	120	90
C ₅ N ₅	225	56.25	120	90	56.25	56.25	56.25	450	120	90

1.3 土壤样品采集与测定

于小黑麦和玉米收获后(2017 年 9 月 28 日), 采用五点法在各小区用土钻分层(0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm)采集原状土样, 在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动, 以免破坏团聚体。将采集的土样带回实验室内风干, 风干后沿自然裂隙掰成约 1 cm 的小土块, 并剔除粗根和小石块, 备用。

土壤水稳性团聚体的分级与测定: 采用湿筛法^[6], 称取风干土样 100 g, 置于团聚体分析仪(Daiki, 日本)套筛顶部(套筛孔径自上而下依次是 5, 3, 2, 1, 0.5, 0.25 mm), 沿桶壁缓慢加入去离子水至水没过土样, 浸泡 5 min, 竖直振荡 5 min, 30 次/min, 振幅为 3 cm。将套筛从水中慢慢取出, 静置, 稍干, 将各级筛层团聚体分别洗入 100 mL 烧杯中, 60 ℃烘干至恒重, 称量各粒径团聚体的质量(准确至 0.01 g), 每个处理 3 次重复, 最后对各粒径质量做平均值计算。

土壤有机碳测定方法: 采用有机碳分析仪(Elementar, 德国)测定土壤总有机碳及各粒径团聚体有机碳含量。采用高锰酸钾氧化—比色法测定活性有机碳含量^[8]。

1.4 数据计算与分析

土壤团聚体质量分形维数(D_m)计算公式^[9]为: $D_m = 3 - \lg[W(\delta < \bar{X}_i) / W_T] / \lg(\bar{X}_i / X_{\max})$ 。式中: $W(\delta < \bar{X}_i)$ 为土粒直径 $< \bar{X}_i$ 的土壤颗粒累计重量(g); W_T 为土粒的重量之和(g); $\bar{X}_i$ 为粒级之间的平均粒径(mm); $X_{\max}$ 为最大粒级的平均直径(mm)。由于 $\lg[W(\delta < \bar{X}_i) / W_0]$ 与 $\lg(\bar{X}_i / X_{\max})$ 具有线性关系, 因此可采用最小二乘法进行线性拟合, $3 - D_m$ 即为直线斜率, 由此得到土壤质量分形维数(D_m)。

不同施肥处理土壤碳库管理指数以裸地作为参考土壤。计算公式^[10]为: 碳库活度(A) = 土壤活性有机碳/(土壤有机碳—活性有机碳); 碳库活度指数(AI) = 样品碳库活度/参考土壤碳库活度; 碳库指数(CPI) = 土

壤有机碳含量(g/kg)/参考土壤有机碳含量(g/kg); 碳库管理指数(CPMI) = 碳库指数 × 碳库活度指数 × 100。

利用 SPSS 19.0 软件对分形维数的回归方程进行线性拟合, 并对土壤团聚体结构及有机碳组分进行 Pearson 相关性检验(双侧), 并用 Duncan 法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 鸡粪与化肥配施对土壤水稳性团聚体(WSC)组成和有机碳(SOC)的影响

由图 1~图 4 可知, 不同施肥处理对饲用小黑麦/玉米轮作土壤水稳性团聚体组成具有显著影响。各土层水稳性团聚体组成均以 < 0.25 mm 粒径为主(30.86%~60.35%)。鸡粪配施化肥处理下土壤 < 0.25 mm 水稳性团聚体数量显著减少。0—40 cm 土层基本表现为 C₀N₀ 处理最高, 其次为 C₀N₁₀、C₂N₈ 和 C₅N₅ 处理(三者无显著性差异), C₄N₆ 处理最低。具体来说, 0—10 cm 土层, 与 C₀N₀ (CK) 相比, C₀N₁₀、C₂N₈、C₄N₆ 和 C₅N₅ 处理分别降低了 34.88%, 36.48%, 42.60%, 32.76%, 且差异均达到 5% 的显著性水平, 其他土层也呈现类似的变化趋势。

不同施肥处理也影响到土壤有机碳在各粒径水稳性团聚体内的分配比例。0—40 cm 土层各粒径团聚体 SOC 含量 ≥ 5 mm 最多, 其次为 5~3, 3~1 mm, 再次为 < 0.25 mm, 1~0.5, 0.5~0.25 mm 最少。与 CK 和 C₀N₁₀ 相比, 鸡粪配施化肥处理的团聚体 SOC 含量均显著增加($p < 0.05$), 增幅大小为 C₄N₆ > C₅N₅ > C₂N₈, 且 C₄N₆ 处理的 SOC 含量明显高于 C₅N₅ 和 C₂N₈ 处理($p < 0.05$)。以上结果说明, 鸡粪配施化肥处理对土壤团聚体 SOC 含量的增加幅度显著大于单施化肥和不施肥, 而在鸡粪与化肥配施处理中, 随鸡粪所占比例的增大, 土壤团聚体 SOC 含量呈现先升后降的变化趋势, 其中 C₄N₆ 处理对土壤团聚体 SOC 含量的提高最为明显。

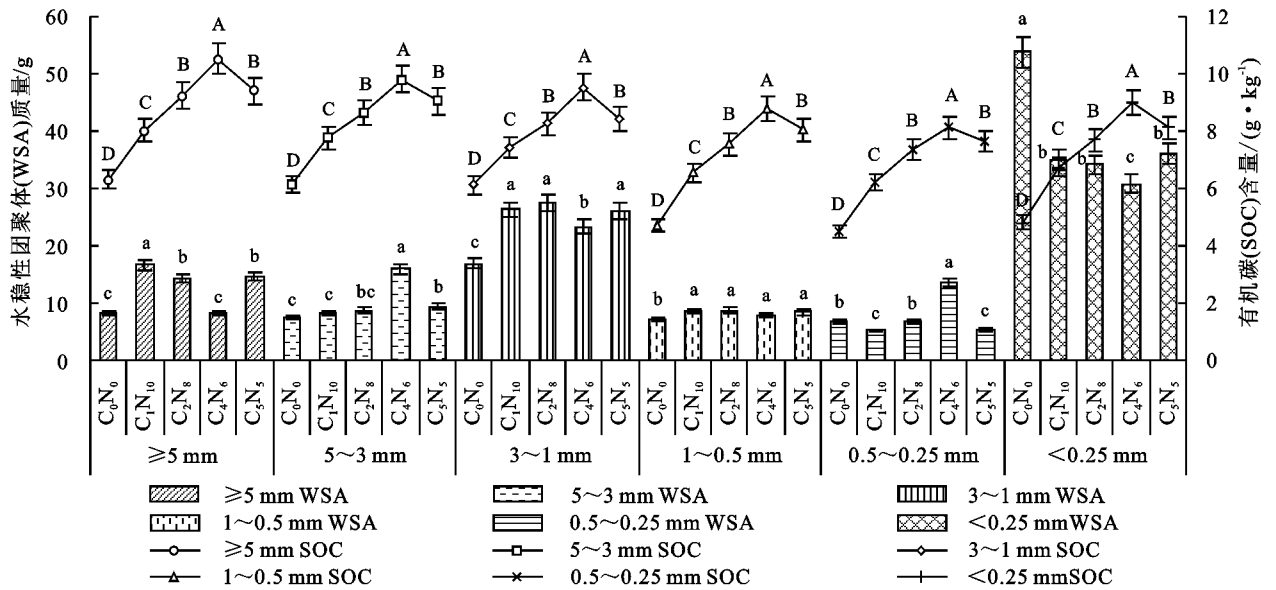


图 1 鸡粪与化肥配施对 0—10 cm 土壤各粒径水稳性团聚体及其有机碳含量的影响

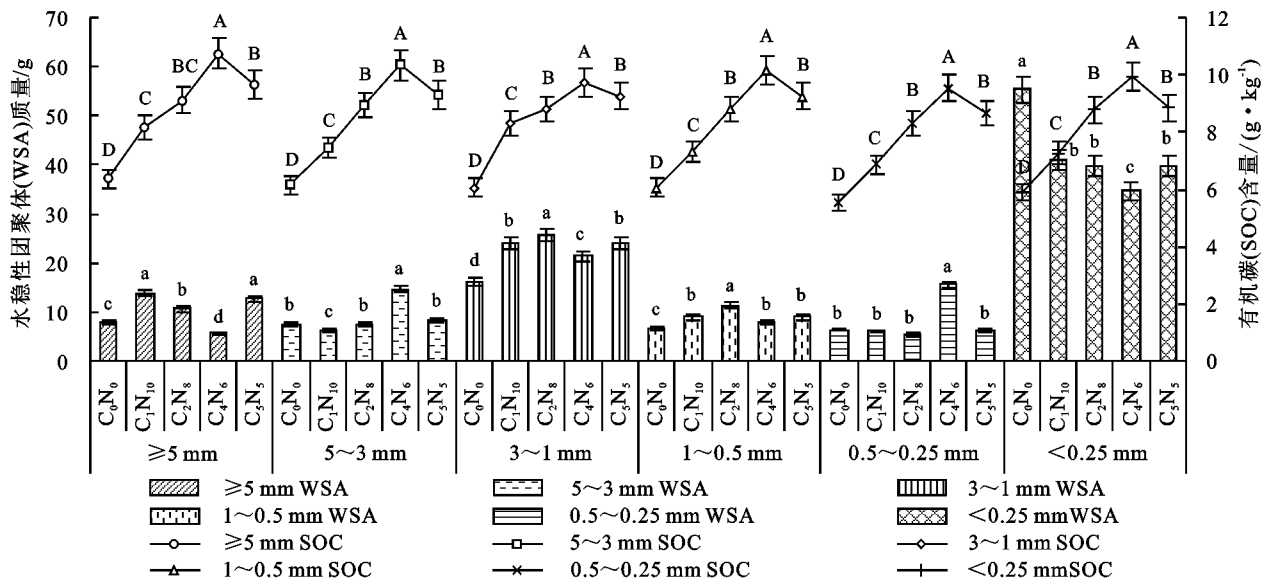


图 2 鸡粪与化肥配施对 10—20 cm 土壤各粒径水稳性团聚体及其有机碳含量的影响

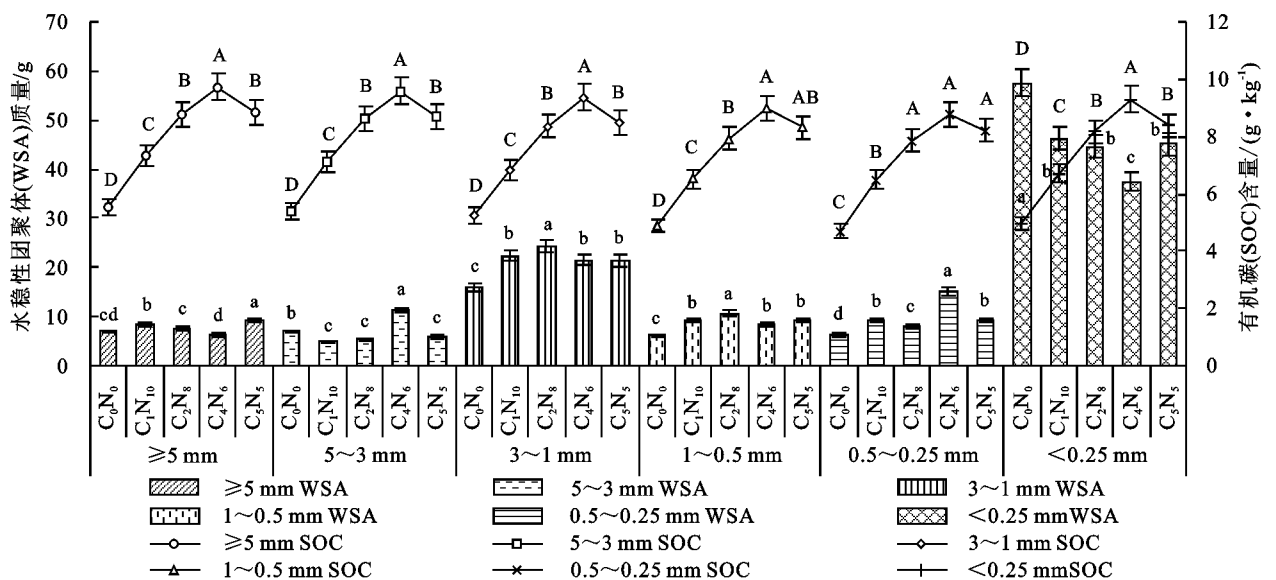


图 3 鸡粪与化肥配施对 20—30 cm 土壤各粒径水稳性团聚体及其有机碳含量的影响

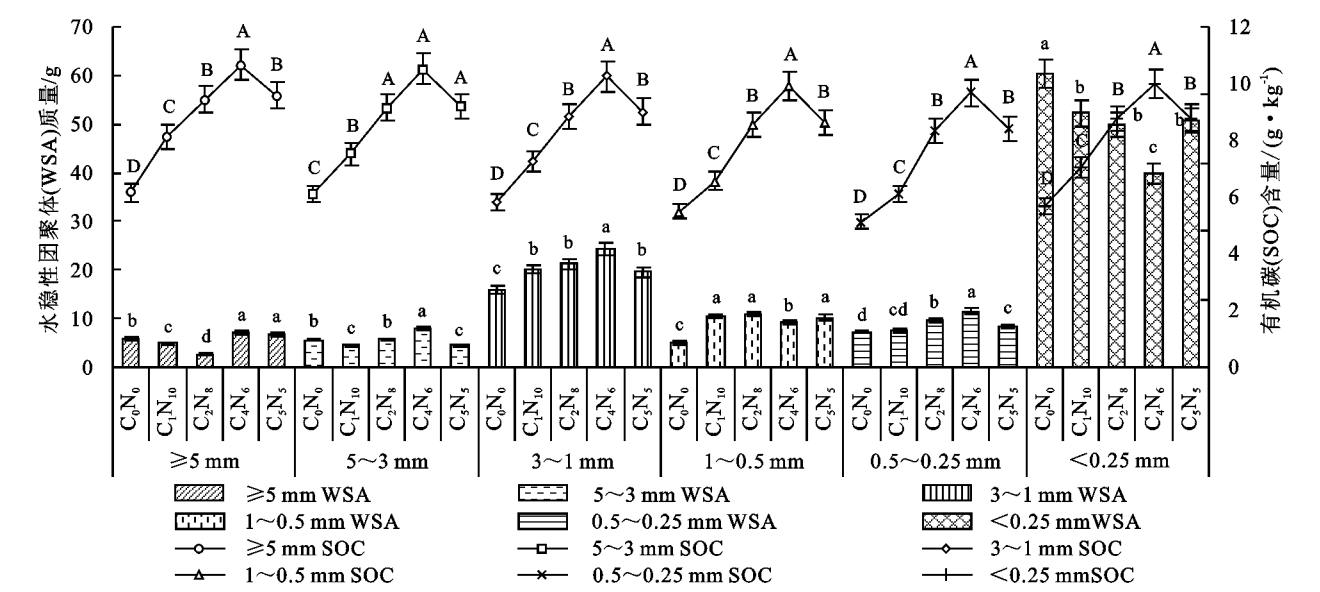


图 4 鸡粪与化肥配施对 30—40 cm 土壤各粒径水稳性团聚体及其有机碳含量的影响

2.2 鸡粪与化肥配施对土壤团聚体质量分形维数 (D_m) 的影响

由图 5 可知,0—40 cm 不同处理土壤 D_m 大小为 $C_0N_0 > C_0N_{10} > C_2N_8 > C_5N_5 > C_4N_6$, 其中 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 土层 D_m 值变化范围分别为 2.63~2.81, 2.66~2.82, 2.69~2.83, 2.70~2.84。可以看出,随着土层的加深, D_m 逐渐增加。CK 处理 D_m 最大, C_0N_{10} 、 C_2N_8 和 C_5N_5 处理次之, C_4N_6 处理最低。由此可见,鸡粪与化肥配施处理能明显降低 D_m , 其中 C_4N_6 处理的效果最明显。

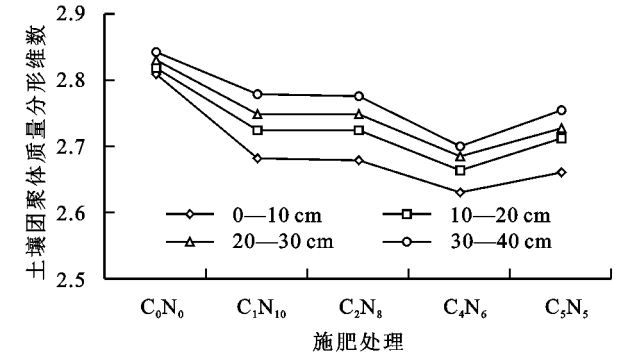


图 5 鸡粪与化肥配施对 0—40 cm 土层土壤质量分形维数的影响

2.3 鸡粪与化肥配施对土壤碳库管理指数 (CPMI) 的影响

由表 3 可知,以 LD(裸地)为参考土壤,各个处理 TOC、AOC、CPI、A、AI 和 CPMI 含量与团聚体有机碳含量的变化趋势基本一致,即 $C_4N_6 > C_5N_5 > C_2N_8 > C_0N_{10} > C_0N_0$, 且同一处理下 TOC、AOC、CPI、A、AI 和 CPMI 含量均随着土层的加深而逐渐降低。其中, 0—10 cm 土层 C_4N_6 处理的 CPMI 为 191.94, 分别较 C_0N_0 、 C_0N_{10} 、 C_2N_8 和 C_5N_5 处理提高 54.56%, 53.94%, 21.88%, 17.04%; 0—20 cm 土层 C_4N_6 处

理的 CPMI 为 173.56, 分别较 C_0N_0 、 C_0N_{10} 、 C_2N_8 和 C_5N_5 处理提高 52.31%, 52.04%, 23.41%, 14.62%; 20—30 cm 土层 C_4N_6 处理的 CPMI 为 147.06, 分别较 C_0N_0 、 C_0N_{10} 、 C_2N_8 和 C_5N_5 处理提高 48.19%, 47.61%, 19.59%, 8.63%; 30—40 cm 土层 C_4N_6 处理的 CPMI 为 142.65, 分别较 C_0N_0 、 C_0N_{10} 、 C_2N_8 和 C_5N_5 处理提高 56.86%, 51.53%, 34.94%, 24.31%, 且土壤表层(0—20 cm) C_4N_6 处理的 CPMI 显著高于其他处理 ($p < 0.05$), C_2N_8 和 C_5N_5 处理的 CPMI 也明显高于 C_0N_0 和 C_0N_{10} 处理, 且 C_2N_8 和 C_5N_5 处理之间, C_0N_0 和 C_0N_{10} 处理之间的 CPMI 差异未达显著水平 ($p > 0.05$)。由此可知,与不施肥(C_0N_0)或单施化肥(C_0N_{10})相比,鸡粪与化肥配施(C_2N_8 、 C_4N_6 、 C_5N_5)更有助于提高土壤的碳库管理指数,而在配施处理中,以 4:6 比例搭配的作用效果最显著。

2.4 相关性分析

对小黑麦/玉米轮作土壤质量分形维数、碳库管理指数、各有机碳(总有机碳、活性有机碳和各粒径团聚体有机碳)进行 Pearson 相关性分析后表明(表 4),土壤团聚体分形维数与碳库管理指数、总有机碳、活性有机碳和各粒径团聚体有机碳基本呈极显著负相关($p < 0.01$),而土壤碳库管理指数与总有机碳、活性有机碳和各粒径团聚体有机碳基本呈极显著正相关($p < 0.01$),这表明增加土壤有机碳含量有利于降低分形维数,提高碳库管理指数,增强土壤的稳定性和供肥性能。

3 讨论

3.1 土壤水稳性团聚体和有机碳的分布特征

多级团聚理论指出,小的水稳性团聚体(< 0.25 mm)是表征土壤生态效应的重要指标,其含量越低,土壤团聚体结构越稳定^[11]。井大炜等^[10]在对芸豆/玉米轮作体系的研究中发现施用有机肥和化肥后土

壤小团聚体数量减少。本研究中,8 年长期施肥后土壤小的水稳性团聚体($<0.25\text{ mm}$)同样表现为显著减少,其原因是长期施肥条件下大量的活性有机物质直接输入土壤,土壤微生物活性提升,土壤团聚体稳定性改善^[10]。本研究进一步发现,小团聚体数量在 0—40 cm 土层均表现为 C_0N_0 处理最高, C_0N_{10} 、

C_2N_8 和 C_5N_5 处理次之(三者无显著性差异), C_4N_6 处理最低。说明在本试验条件下,与不施肥相比,4 : 6 的鸡粪氮与尿素氮的配施水平最有利于土壤团聚体结构的稳定,单施化肥以及 2 : 8 和 5 : 5 的鸡粪氮与尿素氮配施对团聚体稳定性的影响次之,且 3 个处理之间并未出现明显差异。

表 3 鸡粪与化肥配施对饲用小黑麦/玉米轮作土壤碳库管理指数的影响

土层深度/cm	处理	总有机碳 (TOC)	活性有机碳 (AOC)	碳库指数 (CPI)	碳库活度 (A)	碳库活度指数 (AI)	碳库管理 指数(CPMI)
0—10	LD	6.77±0.35c	2.47±0.10d	1.00±0.00b	0.58±0.02cd	1.00±0.00b	100.00±0.00c
	C_0N_0	5.58±0.08d	2.10±0.06e	0.83±0.05b	0.61±0.03bc	1.06±0.09ab	87.22±1.91c
	C_0N_{10}	6.21±0.10c	2.20±0.08e	0.92±0.05b	0.55±0.02d	0.96±0.07b	88.40±6.42c
	C_2N_8	8.93±0.14b	3.52±0.03c	1.33±0.08a	0.65±0.02ab	1.14±0.07ab	149.95±3.86b
	C_4N_6	10.32±0.23a	4.25±0.12a	1.53±0.10a	0.72±0.02a	1.25±0.05a	191.94±11.74a
	C_5N_5	9.75±0.10a	3.89±0.02b	1.45±0.06a	0.67±0.02ab	1.05±0.07ab	159.22±16.43b
10—20	LD	6.28±0.05d	2.26±0.02d	1.00±0.00d	0.56±0.01b	1.00±0.00ab	100.00±0.00c
	C_0N_0	5.22±0.06f	1.90±0.09e	0.82±0.01f	0.56±0.05b	1.00±0.11ab	82.77±8.72c
	C_0N_{10}	5.57±0.06e	1.92±0.07e	0.89±0.03e	0.53±0.02b	0.94±0.06b	83.25±5.30c
	C_2N_8	8.05±0.11c	2.97±0.13c	1.28±0.01c	0.58±0.03ab	1.04±0.05ab	132.93±7.88b
	C_4N_6	9.33±0.10a	3.70±0.05a	1.49±0.01a	0.66±0.03a	1.17±0.02a	173.56±3.11a
	C_5N_5	8.91±0.11b	3.30±0.02b	1.42±0.02b	0.59±0.01ab	1.04±0.03ab	148.18±3.24b
20—30	LD	4.72±0.03d	1.64±0.04c	1.00±0.00d	0.54±0.02a	1.00±0.00a	100.00±0.00c
	C_0N_0	3.79±0.05f	1.27±0.01d	0.80±0.01f	0.51±0.01a	0.95±0.05a	76.19±2.84d
	C_0N_{10}	4.12±0.07e	1.31±0.11d	0.87±0.01e	0.47±0.04a	0.88±0.09a	77.05±9.09d
	C_2N_8	5.99±0.09c	1.99±0.03b	1.27±0.01c	0.50±0.01a	0.93±0.02a	118.25±2.43bc
	C_4N_6	6.94±0.10a	2.41±0.06a	1.47±0.03a	0.53±0.02a	1.00±0.08a	147.06±9.74a
	C_5N_5	6.62±0.06b	2.24±0.04a	1.40±0.02b	0.51±0.01a	0.96±0.05a	134.52±5.30ab
30—40	LD	4.34±0.08d	1.37±0.03bc	1.00±0.00c	0.47±0.02a	1.00±0.00a	100.00±0.00bc
	C_0N_0	3.76±0.07f	0.93±0.04d	0.87±0.02d	0.33±0.03a	0.71±0.04a	61.55±1.90c
	C_0N_{10}	4.06±0.06e	1.04±0.01d	0.94±0.01cd	0.34±0.01a	0.74±0.03a	69.15±2.76bc
	C_2N_8	5.37±0.02c	1.38±0.06bc	1.24±0.03b	0.35±0.02a	0.75±0.06a	92.81±7.54bc
	C_4N_6	6.17±0.10a	1.65±0.14a	1.42±0.05a	0.37±0.06a	0.98±0.16a	142.65±9.31a
	C_5N_5	6.04±0.04b	1.58±0.27ab	1.39±0.02a	0.36±0.08a	0.77±0.14a	107.97±10.50ab

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示同一土层不同处理之间差异显著($p<0.05$)。

表 4 土壤质量分形维数、碳库管理指数与各有机碳的相关性分析

指标	质量分形 维数(D_m)	碳库管理 指数(CPMI)	总有机碳 (TOC)	活性有机碳 (AOC)	团聚体有机碳(SOC)					
					$\geq 5\text{ mm}$	5~3 mm	3~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	$<0.25\text{ mm}$
质量分形维数(D_m)	1	-0.84**	-0.84**	-0.81**	-0.93**	-0.21	-0.88**	-0.83**	-0.80**	-0.84**
碳库管理指数(CPMI)		1	0.93**	0.90**	0.92**	0.16	0.91**	0.88**	0.85**	0.87**

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

目前,许多学者^[12-13]围绕施肥对土壤有机碳的影响开展了大量研究,结果均表明,较不施肥或单施化肥,有机配施化肥可显著提高土壤有机碳含量。本研究同样表明鸡粪配施化肥处理的有机碳(团聚体有机碳、总有机碳和活性有机碳)含量较不施肥和单施化肥均显著提高($p<0.05$)。究其原因,长期施用鸡粪不仅增加了土壤的外源碳,还提高了土壤肥力,而肥力提高的结果是促进了地上部分植物的生长,因此土壤有机残体与根茬的归还量也相应增加^[14]。而单施化肥的土壤,由于缺乏外源有机碳的大量输入,土壤肥力不如前者,导致植物残体数量与根茬的归还量也不高^[10]。因此结果表现为鸡粪配施化肥处理土壤有机碳含量明显高于单施化肥处理和不施肥处理。

本研究进一步分析发现,在配施鸡粪处理中,随着鸡粪所占比例的增大,土壤团聚体 SOC 含量呈现先升后降的变化趋势,当鸡粪氮与尿素氮以 4 : 6 比例搭配时对土壤团聚体 SOC 含量的提高最为明显。分析原因可能是随着鸡粪施入比例的增大,土壤的 SOC 含量随之增加,而当施入比例达到一定阈值时,有机碳的矿化分解速度会有一定程度的降低,因而导致了鸡粪氮与尿素氮以 5 : 5 比例配施(较 4 : 6 比例)时土壤团聚体 SOC 含量下降,但仍然高于 2 : 8 比例配施。而关于单施化肥(较不施肥)对土壤有机碳含量的影响说法不一。樊红柱等^[15]在川北山区的研究中发现单施化肥后土壤有机碳含量降低;张贵龙等^[14]在华北地区夏玉米生产体系的研究中发现,单施化肥后土壤总有机碳和活性有机碳含量无显著性增加;蔡

苗等^[16]研究发现玉米单施化肥后土壤有机碳含量显著升高。由此看出,化肥对土壤有机碳的影响比较复杂,受到土壤团粒结构、矿化条件、生产年限等多种因素综合作用的影响。本试验中,与不施肥相比,单施化肥显著增加了土壤各粒径团聚体有机碳和总有机碳含量($p<0.05$),分析原因可能是一方面化肥促进了植物地上和地下部分生长,植物有机残体较多进入土壤,进而土壤有机碳含量增加;另一方面,本研究表明,较不施肥处理,单施化肥使小团聚体($<0.25\text{ mm}$)数量显著减少($p<0.05$),因而促进了土壤团聚体结构的改善,有利于有机碳在土壤团聚体中的累积。

3.2 土壤团聚体质量分形维数(D_m)和土壤碳库管理指数(CPMI)的表征作用

目前对于分形维数的评定主要是 Tyler 等^[7]提出的分形理论体系,其中 D_m 是该体系的重要参数,该值越小,土壤团聚体稳定性越高^[17]。本研究中,各处理土壤团聚体分形维数值的大小顺序为 $C_0N_0 > C_0N_{10} > C_2N_8 > C_5N_5 > C_4N_6$ 。由此可见,与单施化肥或不施肥相比,实施鸡粪与化肥配施后,土壤团聚体分形维数降低,有效促进土壤团粒结构的稳定,土壤生态功能得到了改善。本研究还表明,不同种植模式土壤机械稳定性和水稳性团聚体 D_m 均随土层加深而逐渐增大,这是因为土层自上而下接收的植物掉落物逐渐减少,有机碳含量逐渐降低,因而导致土壤稳定性逐渐下降^[18]。

CPMI 反映了外界条件对土壤有机碳数量的影响与活性有机碳数量的变化,能比较全面地反映土壤质量优劣,该值越大,越有利于作物生长发育^[10]。何翠翠等^[19]研究表明,化肥配施有机肥可以显著增加玉米/大豆轮作土壤有机碳含量。本研究进一步表明,与不施肥或单施化肥相比,鸡粪与化肥配施显著提高了土壤的总有机碳、活性有机碳和 CPMI,其中又以 C_4N_6 处理效果最显著。同时从相关性分析可知,CPMI 与土壤总有机碳、活性有机碳含量和各粒径团聚体有机碳含量基本呈极显著正相关关系,这进一步印证了鸡粪与化肥配施对土壤的培肥效应,能使土壤肥力增强;而长期不施肥或单施化肥则使土壤肥力下降。此外,CPMI 因结合了土壤总有机碳和土壤活性有机碳指标,因此既反映了施肥方式等外部管理措施对土壤有机碳总量的影响,也反映了土壤有机碳组分的变化情况^[19]。本试验结果显示,与不施肥相比,单施化肥显著提高了土壤总有机碳含量和 CPMI,而活性有机碳含量并无显著性变化($p>0.05$),说明土壤总有机碳和 CPMI 这 2 个指标对施肥措施的响应更为敏感,可作为土壤碳库对外界环境变化的良好反映指标。

4 结论

(1)鸡粪配施化肥处理下土壤水稳性小团聚体($<0.25\text{ mm}$)数量显著减少。与不施肥和单施化肥相比,鸡粪配施化肥处理的小团聚体数量均显著减少($p<0.05$),其中鸡粪氮与尿素氮以 4:6 比例配施处理最低。

(2)与不施肥和单施化肥相比,鸡粪配施化肥处理的团聚体 SOC 含量均显著增加($p<0.05$),且随着鸡粪所占比重的增加,其提高幅度呈先升后降的趋势,当鸡粪氮与尿素氮以 4:6 比例配施时团聚体 SOC 含量最高。

(3)鸡粪配施化肥显著提高了饲用小黑麦/玉米轮作土壤的总有机碳、活性有机碳含量和碳库管理指数,其中 4:6 比例搭配处理最高,并明显高于 2:8 和 5:5 比例搭配处理。

(4)鸡粪配施化肥能明显降低饲用小黑麦/玉米轮作的土壤质量分形维数,其中 4:6 比例处理最低。相关性分析表明,土壤质量分形维数、碳库管理指数与土壤总有机碳、活性有机碳、各粒径团聚体有机碳之间存在极显著的相关关系,各指标间具有密切的内部关联。综上所述,与不施肥或单施化肥相比,鸡粪配施化肥处理下土壤水稳性团聚体 D_m 降低,土壤团聚体稳定性提高,同时 CPMI 提高,碳“汇”效应充分体现,其中鸡粪配施化肥 4:6 比例处理效果最佳。当然,土壤作为一种半可再生资源,其性质的变化是一个复杂且长期的过程,今后应建立长期的监测机制,在原有试验的基础上,进行多种有机肥和化肥的配施试验,进一步从中筛选出多种适宜的施肥方式以充分提高豫北地区农田土壤的生态服务功能。

参考文献:

- [1] 杨小辉,王春宏,姜佰文. 氮素调控对复种条件下饲用小黑麦—青贮玉米产量和品质的影响[J]. 作物杂志,2011(4):70-73.
- [2] Eva S, Elisabet N. Effects of intercropping on yield, weed incidence, forage quality and soil residual N in organically grown forage maize (*Zea mays* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. Field Crops Research, 2014, 169: 21-29.
- [3] 刘中良,宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):447-455.
- [4] 何淑勤,郑子成,宫渊波. 不同退耕模式下土壤水稳性团聚体及其有机碳分布特征[J]. 水土保持学报,2011,25(5):229-233.
- [5] 李硕,李有兵,王淑娟,等. 关中平原作物秸秆不同还田方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(4):1215-1222.

- 133-137.
- [12] Hueso S, Hernandez T, Garcia C. Resistance and resilience of the soil microbial biomass to severe drought in semiarid soils: The importance of organic amendments [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 50: 27-36.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 22-166.
- [14] 明安刚, 张治军, 湛红辉, 等. 抚育间伐对马尾松人工林生物量与碳贮量的影响[J]. *林业科学*, 2013, 49(10): 1-6.
- [15] Sullivan T P, Sullivan D S. Acceleration of old-growth structural attributes in lodgepole pine forest: Tree growth and stand structure 25 years after thinning [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, 365: 96-106.
- [16] 徐金良, 毛玉明, 成向荣, 等. 间伐对杉木人工林碳储量的长期影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 1898-1904.
- [17] 孙志虎, 王秀琴, 陈祥伟. 不同抚育间伐强度对落叶松人工林生态系统碳储量影响[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(12): 1-13.
- [18] 尉海东, 马祥庆. 中亚热带不同发育阶段杉木人工林生态系统碳贮量研究[J]. *江西农业大学学报*, 2006, 28(2): 239-243.
- [19] 郭纯子, 吴洋洋, 倪健. 天童国家森林公园植被碳储量估算[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3099-3109.
- [20] Nave L E, Vance E D, Swanston C W, et al. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(5): 857-866.
- [21] Campbell J, Alberti G, Martin J, et al. Carbon dynamics of a ponderosa pine plantation following a thinning treatment in the northern Sierra Nevada [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 453-463.
- [22] Nilsen P, Strand L T. Thinning intensity effects on carbon and nitrogen stores and fluxes in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand after 33 years [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(3): 201-208.
- [23] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 等. 黄土高原子午岭森林碳储量与碳密度研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 123-126.
- [24] Chen X L, Han Y H, Chen X, et al. Soil labile organic carbon and carbon-cycle enzyme activities under different thinning intensities in Chinese fir plantations [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 162-169.
- [25] 陈莉, 宋敏, 宋同清, 等. 广西不同林龄软阔林碳储量及其分配格局[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(3): 592-600.
- (上接第 189 页)
- [6] 成艳红, 武琳, 孙慧娟, 等. 稻草覆盖和香根草篱对红壤水稳性团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(12): 3518-3524.
- [7] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362-369.
- [8] 李娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(7): 2147-2156.
- [9] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [10] 井大伟, 王明友, 张红, 等. 鸡粪对芸豆土壤有机碳氧化稳定性与碳库管理指数的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 192-200.
- [11] Huang R, Lan M L, Liu J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: The role of different straws returning [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(36): 27942-27952.
- [12] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 施用畜禽粪便和化肥对土壤活性有机碳库和团聚体稳定性影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 233-238.
- [13] 杨滨娟, 黄国勤, 兰延, 等. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2907-2913.
- [14] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 359-365.
- [15] 樊红柱, 张建辉, 王勇, 等. 川北山区坡耕地侵蚀耕作对土壤团聚体碳的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 157-164.
- [16] 蔡苗, 孟延, Mohammad A A, 等. 长期不同施肥对玉米根茬生物量及养分累积量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2387-2396.
- [17] 杨金玲, 李德成, 张甘霖, 等. 土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J]. *土壤学报*, 2008, 45(3): 413-419.
- [18] 马帅, 赵世伟, 李婷, 等. 子午岭林区植被自然恢复下土壤剖面团聚体特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 157-161.
- [19] 何翠翠, 王立刚, 王迎春, 等. 长期施肥下黑土活性有机质和碳库管理指数研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 194-202.