

夏闲期复播绿肥对旱地麦田土壤团聚体碳氮含量的影响

祁琛¹, 吴林甲¹, 闫秋艳^{2,3}, 闫双堆¹, 董飞², 李峰², 程永钢^{1,3}, 黄肖¹

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801;2.山西农业大学小麦研究所,
山西 临汾 041000;3.山西省土壤环境与养分资源重点实验室,太原 030031)

摘要:为探究不同绿肥品种翻压条件下晋南旱地麦田土壤团聚体稳定性以及有机碳(SOC)和全氮(TN)在不同粒径团聚体的分布特征,深入了解不同种类绿肥的增碳保氮机制。已连续 3 年(2018—2021 年)不同绿肥品种(对照休闲、大豆、绿豆、油菜、玉米)翻压还田后冬小麦收获期 0—10, 10—20, 20—30 cm 土壤为研究对象,采用湿筛法进行土壤粒径分级,并分析粗大团聚体(>2 mm)、细大团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉黏粒组分(<0.053 mm)中 SOC 和 TN 含量,测算团聚体的构成与稳定性($R_{0.25}$, >0.25 mm 团聚体含量;MWD, 平均重量直径;GMD, 几何平均直径),并测定各粒径团聚体 SOC 和 TN 及其对土壤总有机碳和总氮的贡献率。结果表明:不同绿肥处理下旱地麦田土壤团聚体质量占比均以细大团聚体 0.25~2 mm 为主(占 22.77%~39.71%)。复播绿肥显著增加 0—30 cm 土层>2 mm 粒径团聚体质量占比,以大豆绿肥增加最明显,0.25~2, 0.053~0.25 mm 粒径团聚体质量占比降低,对<0.053 mm 粉黏粒的影响不明显;大豆绿肥对各土层 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 值提高作用明显。大豆和玉米对 0—30 cm 各土层土壤总有机碳含量具有显著提高作用,分别提高 27.83%和 25.71%。大豆绿肥进一步提高土壤各粒径团聚体有机碳含量。复播绿肥降低土壤全氮含量,大豆绿肥处理的降低程度最小,且对<0.053 mm 粉黏粒全氮含量具有增加作用。0.25~2, >2 mm 大团聚体对 0—10 cm 土层土壤有机碳和全氮的贡献率最高;复播绿肥提升土壤碳氮比(平均 21.39),较对照休闲(平均 13.71)提高 7.68,其中玉米提升效果最佳,大豆次之。综合土壤增碳固氮效果,连续 3 年翻压大豆绿肥可有效提高旱地麦田土壤团聚体稳定性,提升土壤肥力。

关键词:旱地麦田;绿肥品种;土壤团聚体;有机碳;全氮

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)04-0304-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.037

Effects of Green Manure Application on Soil Organic Carbon and Nitrogen Content Among Aggregates Fractions in Dryland Wheat Fields

QI Chen¹, WU Lingjia¹, YAN Qiuyan^{2,3}, YAN Shuangdui¹,

DONG Fei², LI Feng², CHENG Yonggang^{1,3}, HUANG Xiao¹

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801;

2.Institute of Wheat Research, Shanxi Agricultural University, Linfen, Shanxi 041000;

3.Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi 030031)

Abstract: In order to investigate the stability of soil aggregates and the distribution characteristics of organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) aggregates in different particle sizes under different green manures application in dryland wheat fields in southern of Shanxi Province, and further understand the mechanism of carbon and nitrogen conservation of different green manures. Topsoil samples of 0—10, 10—20 and 20—30 cm after three consecutive years (2018—2021) during the winter wheat harvest period were collected under different green manure treatments (control, soybean, mung bean, sunflower, maize). Wet sieve method was used to classify the soil particle size. The contents of SOC and TN in coarse macroaggregates (>2 mm), fine macroaggregates (0.25~2 mm), microaggregates (0.053~0.25 mm) and silt+clay (<0.053 mm), and the

收稿日期:2023-01-16

资助项目:国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22);山西省土壤环境与养分资源重点实验室开放基金项目(2020002);国家自然科学基金项目(U22A20609)

第一作者:祁琛(1998—),男,硕士研究生,主要从事旱地土壤—作物互作调控研究。E-mail:958399519@qq.com

通信作者:闫秋艳(1983—),女,博士,副研究员,主要从事旱地土壤—作物互作调控研究。E-mail:sxnkyqy@163.com

程永钢(1978—),男,硕士,副研究员,主要从事绿肥应用技术研究及推广。E-mail:Cygh2609@163.com

stability of aggregates ($R_{0.25}$, aggregates mass fractions of >0.25 mm; MWD, mean weight diameter; GMD, geometric mean diameter) were measured. The contribution rates of aggregate SOC and TN to soil total organic carbon and total nitrogen of different particle sizes were measured. The results showed that the proportion of soil aggregate mass of fine and large aggregates was mainly $0.25\sim 2$ mm ($22.77\%\sim 39.71\%$) under different green manure treatments. Aggregates mass fractions of >2 mm in $0\sim 30$ cm soil layer was significantly increased under green manure application, especially under soybean green manure, while the mass proportion of $0.25\sim 2$ mm and $0.053\sim 0.25$ mm particle size decreased, the mass proportion of <0.053 mm showed no obvious. Soybean green manure significantly increased $R_{0.25}$, MWD and GMD values in all soil layers. Soybean and maize significantly increased the soil total organic carbon content in $0\sim 30$ cm soil layers by 27.83% and 25.71% , respectively. Soybean green manure further increased the content of SOC in soil aggregates of different particle sizes. Applying green manure reduced the soil total nitrogen content, soybean green fertilizer treatment had the smallest reduction degree, and had an effect on increasing the total nitrogen content of <0.053 mm silt clay. The contribution rates of soil organic carbon and total nitrogen in $0\sim 10$ cm soil layer were the highest in large aggregates of $0.25\sim 2$ and >2 mm. Green manure (mean 21.39) application increased the soil C/N ratio by 7.68 compared with the control fallow (mean 13.71), among which maize had the best lifting effect, followed by soybean. Combined with the effect of soil carbon and preserve nitrogen in dryland wheat fields, soybean green manure for three consecutive years can effectively improve the stability of soil aggregates and soil fertility.

Keywords: dryland wheat fields; green manure; soil aggregate; soil organic carbon; total nitrogen

山西省旱地小麦主要集中在晋南地区,占到全省的 60% ,对小麦总产具有决定性作用^[1]。长期以来,旱地小麦生产主要依靠天然降水,加之不合理的耕作、施肥措施,使得旱作区水土流失严重,土壤肥力下降已成为制约旱地小麦生长的关键因素。因此,提升土壤肥力水平对晋南地区旱地小麦可持续发展至关重要。旱地小麦夏闲期的 $6\sim 9$ 月,降水占全年降水量的 70% 以上,该期间光照资源丰富且雨热同期,土壤中水分和养分运移量大,养分转化也比较活跃^[2]。因此,研究夏闲期培肥对旱地小麦可持续生产具有重要意义。

绿肥是重要的有机肥源,可利用旱地小麦休闲期的水热资源种植绿肥并翻压还田,改善土壤结构和土壤肥力^[3]。目前在旱地小麦生产系统应用的绿肥品种有苜蓿、油菜、毛叶苕子、草木樨、怪麻、花生、大豆、黑豆、绿豆、乌豇豆等^[4],在短期内对土壤有机碳和养分含量均有提高作用。但是,旱地小麦绿肥主要侧重于生物量较小的绿肥品种对生物量较大的绿肥品种对土壤肥力的提升作用较少。绿肥腐解过程中形成的腐殖质等有机胶体可以与土粒结合,形成有机无机复合胶体,改善土壤结构,提高土壤稳定性^[5]。已有研究^[6]表明, >0.25 mm 水稳性团聚体含量和土壤有机碳含量呈正比,土壤有机碳含量同土壤稳定性呈正相关关系,即土壤中 >0.25 mm 团聚体含量越高,土壤有机碳含量越高,土壤稳定性越强,土壤团聚体与土壤有机碳关系密不可分。白璐等^[7]研究发现,复播毛叶苕子的麦田 >0.5 mm 粒径团聚体对土壤总有机

碳贡献率最大;乔鑫鑫等^[8]研究发现, >2 mm 粒径团聚体有机碳和全氮含量在大豆—小麦复种模式中较玉米—小麦模式高;王慧等^[9]在水稻上发现,翻压紫云英使 >0.25 mm 团聚体的碳氮含量显著增加。由此可见,不同绿肥品种在不同生长系统对土壤有机碳和全氮的影响在不同团聚体中存在差异,目前的研究主要侧重于有机碳的分布特征,对全氮的分析较少。

有关旱地小麦翻压绿肥的研究主要集中在土壤水分^[10-11]、养分转化^[12]以及作物养分吸收和利用^[13-14]等方面,且侧重于生物量较小的品种,对较高生物量绿肥品种对土壤团聚体稳定性及碳氮含量的影响研究尚缺乏,限制了绿肥对旱地麦田土壤肥力提升的增效机制。晋南地区小麦复播作物主要有玉米、大豆、油菜等作物,因地制宜选择绿肥培肥作物对晋南旱地小麦提质增效至关重要。因此,如何选择适宜晋南地区的旱地小麦绿肥品种需要进一步明确。本研究依托定位试验,旨在揭示不同绿肥翻压还田下土壤团聚体及有机碳和全氮的分布,明确旱地麦田复播绿肥土壤肥力特征,为进一步科学合理地应用绿肥培肥以及旱地小麦稳产增产提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验在山西省临汾市尧都区吴村镇洪堡村山西农业大学小麦研究所国家试验站($111^{\circ}33'07''E$, $36^{\circ}13'02''N$)进行,该区属温带大陆性季风气候,海拔 457.90 m,年降

水量 468.5 mm, 年蒸发量 1 829.4 mm, 年日照时间 2 416.5 h, 年均气温 12.20 °C。试验地为小麦一年一作, 雨养旱地。6 月收获至 9 月底播种前为旱地小麦夏闲期。试验地土壤为石灰性褐土, 2018 年 6 月种植绿肥前 0—20 cm 土层土壤基础养分含量为: pH 为 8.64, 有机质含量为 20.71 g/kg, 全氮含量为 0.89 g/kg, 碱解氮含量为 52.42 mg/kg, 速效磷含量为 5.43 mg/kg, 速效钾含量为 153.3 mg/kg。

1.2 试验设计

采用随机区组试验设计。2018 年 6 月冬小麦收获后, 硬茬点播不同绿肥品种(大豆、绿豆、油菜、玉米), 以休闲为对照, 共 5 个处理方式。绿肥品种分别为大豆品种“晋豆 37 号”, 绿豆品种“毛绿一号”, 油菜品种“矮大头 567DW”, 玉米品种“联创 808”。大豆、绿豆、油菜播种密度均设置为 150 kg/hm², 玉米播种密度为 6.75 × 10⁴ 粒/hm²。每处理重复 3 次, 共 15 个小区, 各小区面积 10 m × 20 m = 200 m²。6 月 15 日播种绿肥(根据降雨量情况选择播种日期)。当绿肥生物量最大时期(8 月 20 日), 将绿肥灭茬并旋耕于土壤中, 旋耕深度 20—25 cm, 至 10 月初小麦播种。2019 年 6 月和 2020 年 6 月小麦收获后进行以上处理。大豆、绿豆、油菜、玉米翻压时生物量(鲜样)3 年平均为 8 196, 10 915, 18 079, 24 532 kg/hm², C/N 分别为 25.75, 19.69, 34.12, 63.19。

小麦品种为“晋麦 92 号”, 播种量 150 kg/hm², 种肥同播, 复合肥料(N : P₂O₅ : K₂O = 25 : 14 : 6, 总养分 ≥ 45%, 中化农业生态科技有限公司)用量 750 kg/hm²。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集 供试土壤样品采集于 2021 年 6 月 27 日冬小麦收获期, 按照“随机多点”的原则采集各小区 0—10, 10—20, 20—30 cm 原状土样约 1 kg, 置于铝制盒(长 20 cm, 宽 10 cm, 高 6 cm)后带回实验室(运输中尽量减少翻压震动), 防止土块的外力变形, 后在阴凉干燥处自然风干, 剔除石块、根系、秸秆等杂物。

1.3.2 测定方法 为更加准确地重现土壤团聚体的稳定性及土壤抗侵蚀能力, 采用湿筛法^[6]对供试土壤样品进行团聚体筛分, 筛分为粗大团聚体(>2 mm)、细大团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)和粉黏粒(<0.053 mm)4 个粒径, 筛分后装入自封袋。利用重铬酸钾—浓硫酸外加热法^[9]对各粒径团聚体和全土中的有机碳含量进行测定。土壤全氮(TN)采用 K₂SO₄—CuSO₄—Se 催化剂和浓硫酸消化, 半微量开氏法^[9]测定。

1.4 计算方法

(1) 不同粒级土壤团聚体质量百分比

$$R_i = m_i / m \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_i 为 i 粒级团聚体质量分数(%); m_i 为 i 粒级团聚体质量(g); m 为土壤各粒级团聚体质量的总和。

(2) 粒径 > 0.25 mm 的团聚体质量分数

$$R_{0.25} = m_{r>0.25} / m \times 100\% = (1 - m_{r<0.25} / m) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $m_{r>0.25}$ 为粒径 > 0.25 mm 团聚体质量(g); $m_{r<0.25}$ 为粒径 < 0.25 mm 团聚体质量(g)。

(3) 平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)

$$\text{MWD} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (3)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (4)$$

式中: MWD 为平均重量直径(mm); GMD 为几何平均直径(mm); W_i 为各粒级团聚体的重量百分比(%); X_i 为各粒级的平均直径(mm)。

(4) 不同粒级团聚体 C 对土壤 C 的贡献率

$$R_c = \frac{100(AC_i \cdot W_i)}{TC} \quad (5)$$

式中: R_c 为贡献率(%); AC_i 为某粒级团聚体 C 含量(g/kg); W_i 为该粒级团聚体所占百分比(%); TC 为该层土壤 C 的含量(g/kg)。

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 软件进行基础数据处理, SPSS Statistics 27 软件进行显著性分析(显著性分析水平为 $p < 0.05$), Origin 2021 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 复播绿肥对土壤水稳性团聚体质量占比及稳定性的影响

由表 1 可知, 不同绿肥处理下旱地麦田 0—10 cm 土层, 土壤团聚体质量占比以细大团聚体 0.25~2 mm 为主, 占比为 32.84%~38.33%, 其次是 > 2 mm 粗大团聚体, 占比为 20.77%~35.46%, 0.053~0.25 mm 微团聚体占比为 17.31%~25.48%, < 0.053 mm 粉黏粒占比最低, 为 10.94%~15.42%。10—20, 20—30 cm 土层土壤团聚体质量占比以细大团聚体 0.25~2 mm 为主, 其次是 0.053~0.25 mm 微团聚体和 > 2 mm 粗大团聚体。< 0.053 mm 粉黏粒占比仍然最低。可见, 绿肥对大团聚体的增加作用主要集中在 0—10 cm 表层。

与对照现行比, 复播绿肥使 0—10, 10—20, 20—30 cm 各土层 > 2 mm 粒径团聚体分别提高 42.51%~70.73%, 3.63%~39.11%, 1.20%~19.21%, 其中复播大豆和绿豆对 0—10 cm 土层增加作用最大。复播绿肥使 0—10, 10—20, 20—30 cm 各土层 0.25~2 mm 粒径团聚体分别降低 2.12%~20.45%, 6.59%~15.55%, 21.68%~27.70%。复播绿肥均减少 0—

10 cm 土层 0.053~0.25 mm 粒径团聚体占比,10—20,20—30 cm 土层 0.053~0.25 mm 粒径团聚体占比在复播大豆处理下显著降低,其余处理间差异不显著。可见,大豆相比其他绿肥较大程度降低 0.053~0.25 mm 粒径团聚体占比。复播大豆和绿豆显著降低 0—10 cm 土层<0.053 mm 粉黏粒占比。复播绿肥对 10—20,20—30 cm 土层<0.053 mm 粉黏粒影响不显著。

表 1 不同处理土壤水稳性团聚体组成

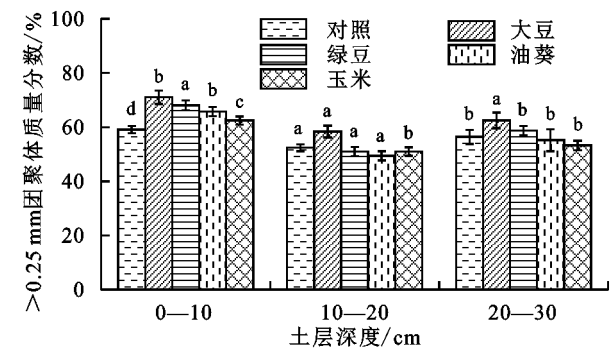
土层深度/cm	处理	各粒级团聚体质量占比/%			
		>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
0—10	对照	20.77±1.05c	38.33±1.59a	25.48±0.91a	15.42±1.17a
	大豆	35.46±2.26a	35.51±2.76b	17.31±0.46c	11.72±0.97b
	绿豆	30.52±1.94b	37.50±1.59a	21.04±0.68b	10.94±1.06b
	油葵	29.60±2.05b	36.19±1.39a	20.36±0.85b	13.86±1.52ab
	玉米	29.62±1.64b	32.84±1.36b	21.90±0.43b	15.63±1.12a
10—20	对照	20.66±1.45b	31.71±1.15a	27.28±1.01a	20.35±2.42a
	大豆	28.74±1.47a	29.62±2.90a	23.59±1.85b	18.05±2.87a
	绿豆	22.43±1.96b	28.61±1.40a	28.18±1.50a	20.78±3.20a
	油葵	21.41±1.40b	28.02±2.02a	29.07±1.29a	22.50±2.51a
	玉米	24.20±1.90b	26.78±1.19b	27.16±0.70a	21.86±1.34a
20—30	对照	16.67±3.15b	39.71±2.03a	26.18±1.28a	17.45±2.58a
	大豆	31.82±4.15a	30.64±1.67b	21.49±1.46b	16.05±2.83a
	绿豆	29.96±2.20a	28.71±1.38b	25.82±1.32a	15.50±1.49a
	油葵	24.08±4.44ab	31.10±3.63b	28.60±0.80a	16.22±1.77a
	玉米	22.62±1.74ab	30.62±1.80b	29.31±0.79a	17.45±2.13a

注:表中数据为平均值±标准差(n=3);同列不同小写字母表示同一粒径团聚体不同处理间差异显著(p<0.05)。下同。

由图 1 可知,复播不同绿肥均可以提高 0—10 cm 土层>0.25 mm 大团聚体质量占比,其中大豆、绿豆、油葵和玉米分别比对照增加 10.49%,15.09%,11.32%,5.69%。10—20 cm 土层中,除大豆提高 11.44%外,其余各处理与对照差异不显著。20—30 cm 土层中,大豆和绿豆分别增加 10.78%和 4.06%。

由图 2 可知,复播绿肥比对照均可以提高 0—10 cm 土层团聚体稳定性,其中大豆、绿豆、油葵和玉米使 GMD 分别提高 41.60%,36.77%,23.62%,12.18%,MWD 值分别提高 22.14%,19.99%,16.22%,12.36%。该变化直观反映出旱地麦田夏闲期长期复播绿肥有利于提高土壤尤其是表层(0—10 cm)团聚体稳定性。综合来看,大豆和绿豆处理在各个土层团聚体稳定性均高于对照处理。油葵和玉米处理除在 0—10 cm 土层中显

著提高团聚体稳定性外,其他土层的团聚体稳定性与对照差异不显著。可见,豆科绿肥对提高旱地麦田土壤团聚体稳定性具有重要作用。



注:图中的数据为平均值±标准差(n=3);图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著(p<0.05)。下同。

图 1 不同处理土壤>0.25 mm 大团聚体(R_{0.25})的质量分数

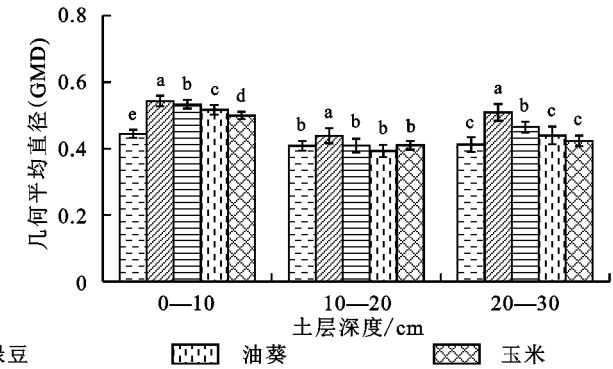
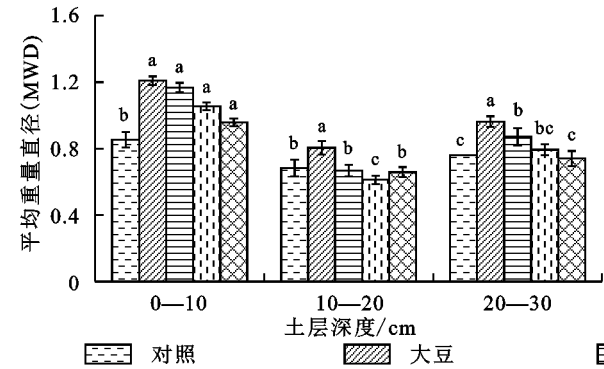


图 2 不同处理土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)

2.2 复播绿肥土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中有有机碳和全氮含量

由表 2 可知,连续 3 年翻压绿肥均使 0—30 cm 土层有机碳含量增加,土壤有机碳含量总体上呈现出随着土层深度增加而有机碳含量降低的趋势。其中大豆、绿豆、油葵、玉米分别使 0—10 cm 土层有机碳提高 25.20%,13.71%,16.12%,25.91%,绿肥处理间差异不显著。10—20 cm 分别增加 29.32%,19.71%,15.33%,27.54%;20—30 cm 分别增加 29.01%,12.41%,5.40%,23.60%;0—30 cm 土壤有机碳含量平均增加 27.83%,

15.32%,12.33%,25.71%。可见,大豆和玉米对土壤有机碳的提升作用较明显。

不同绿肥种类影响有机碳在不同粒径团聚的分布特征。>2,0.25~2 mm 大团聚体中,大豆与对照组相比有机碳含量提高最为显著,绿豆在 0—20 cm 土层与对照组相比有机碳含量提高显著;0.053~0.25 mm 微团聚体中,大豆处理有机碳含量提高最为显著,其他各处理与对照组无显著差异;<0.053 mm 粉黏粒中,大豆对各土层有机碳含量的增加作用显著。可见,大豆对提高土壤团聚体有机碳含量具有显著作用。

表 2 不同处理土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中有有机碳含量

土层深度/cm	处理	全土有机碳含量/ (g · kg ⁻¹)	各粒级团聚体有机碳含量/(g · kg ⁻¹)			
			>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
0—10	对照	14.04±0.89b	11.31±0.69c	11.32±0.49c	10.30±0.12b	10.74±0.56bc
	大豆	17.59±2.96a	17.44±0.41a	16.64±1.04a	15.62±1.80a	16.42±0.82a
	绿豆	15.97±1.77ab	13.71±0.49b	13.70±0.82b	11.21±0.59b	12.22±0.19b
	油葵	16.30±0.90a	10.98±0.56c	12.00±0.41bc	9.85±0.20b	9.85±0.39c
	玉米	17.68±1.47a	12.67±0.93bc	13.92±0.19b	12.01±0.41b	12.12±0.63b
10—20	对照	13.14±1.18b	6.79±1.09b	8.04±1.69b	6.23±1.67c	5.20±2.48c
	大豆	17.01±1.28a	14.48±0.88a	14.61±0.71a	11.55±1.18a	15.74±1.12a
	绿豆	15.73±1.30ab	12.23±0.20a	14.39±0.97a	9.50±0.71b	11.10±0.30b
	油葵	15.16±1.33ab	6.45±2.89b	8.15±0.20b	5.55±0.74c	7.13±0.52bc
	玉米	16.76±1.33ab	10.52±1.23ab	11.10±0.63b	7.81±0.34b	11.43±1.08b
20—30	对照	10.27±0.45b	3.62±0.12c	4.53±0.11b	3.40±0.39b	4.30±0.41b
	大豆	13.25±2.72a	8.83±2.12a	9.84±2.72a	7.69±2.00a	9.85±2.56a
	绿豆	11.55±1.04ab	7.13±0.59ab	6.45±0.52b	4.42±0.52b	6.00±0.41b
	油葵	10.83±0.52b	5.09±0.34b	5.55±0.11b	3.96±0.60b	4.08±0.39b
	玉米	12.71±1.96a	9.86±1.53a	9.28±2.10a	7.70±1.31a	8.84±2.38a

由表 3 可知,复播绿肥降低土壤全氮含量,豆类绿肥与对照的全氮含量差异不显著,油葵和玉米对土壤全氮的降低程度较大,其中玉米在 10—20,20—30 cm 土层显著降低土壤全氮含量。>2,0.25~2 mm 大团聚体全氮含量在复播绿肥后均有所降低。值得注意的是,豆科绿肥对 0.053~0.25 mm 微团聚体和<0.053 mm 粉黏粒中全氮含量影响与对照差异不明显,且出现部分土层氮含量增加的趋势。可见,豆科绿肥使更多的氮储存于粉黏粒中。

由表 4 可知,土壤有机碳含量与各粒径团聚体和粉黏粒中有机碳均呈极显著正相关关系。土壤全氮含量与>2,0.25~2 mm 大团聚体全氮含量呈极显著正相关关系。土壤有机碳含量与 0.25~2,0.053~0.25,<0.053 mm 团聚体中全氮含量呈显著正相关关系。

2.3 团聚体有机碳和氮对土壤有机碳和氮的贡献率

从图 3 可以看出,0—30 cm 旱地麦田夏闲期长期复播绿肥后各粒级团聚体对土壤有机碳贡献率由大到小为(0.25~2 mm)>(>2 mm)>(0.053~0.25 mm)>(<0.053 mm),>0.25 mm 大团聚体对土壤

有机碳的贡献率高于小团聚体,且各处理均呈现出这种趋势。在 0—10 cm 土层,团聚体贡献率受绿肥影响变化程度较大,共同呈现出>2 mm 大团聚体贡献率升高的趋势,其中大豆、绿豆、油葵处理对土壤有机碳贡献率提高最明显,在 0.25~2 mm 大团聚体和<0.25 mm 小团聚体中,贡献率呈降低趋势,<0.053 mm 粉黏粒对整体土壤有机碳贡献率不大,且受绿肥影响变化幅度较小;10—20 cm 土层中 0.25~2 mm 大团聚体的贡献率在绿肥处理降低,<0.053 mm 粉黏粒贡献率在绿肥处理升高;20—30 cm 土层大豆、绿豆、油葵处理仍可显著提升>2 mm 大团聚体对土壤有机碳贡献率。

从图 3 还可以看出,0.25~2,>2 mm 大团聚体对土壤氮的贡献率整体较高。复播绿肥整体降低 0—10,20—30 cm 土层<0.053 mm 粉黏粒中氮对土壤氮的贡献率。

2.4 复播绿肥土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中碳氮比

由表 5 可知,与对照休闲(平均 14.44)比,复播绿

肥(平均 20.92)提升土壤碳氮比。同时,复播绿肥提升各粒级团聚体和粉黏粒中碳氮比。总体来说,大豆对各土层各粒径团聚体碳氮比提升作用明显,增幅为 33.77%~183.84%。

表 3 不同处理土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中全氮含量

土层深度/cm	处理	全土全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	各粒级团聚体全氮含量/(g·kg ⁻¹)			
			>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
0—10	对照	0.91±0.06a	0.82±0.04a	0.91±0.06a	0.75±0.04a	0.70±0.02a
	大豆	0.77±0.10ab	0.77±0.08a	0.89±0.04a	0.66±0.05a	0.80±0.02a
	绿豆	0.73±0.10ab	0.81±0.09a	0.89±0.08a	0.68±0.11a	0.73±0.02a
	油葵	0.63±0.05b	0.68±0b	0.73±0.02b	0.61±0.04ab	0.73±0.08a
	玉米	0.77±0.05ab	0.68±0.29b	0.77±0.14b	0.59±0.02ab	0.66±0.02a
10—20	对照	0.98±0.05a	0.89±0.04a	0.84±0.08a	0.61±0.04a	0.75±0a
	大豆	0.80±0.17a	0.70±0.02b	0.79±0.25a	0.59±0.10a	0.80±0.02a
	绿豆	0.97±0.06a	0.87±0.06a	0.82±0.22a	0.50±0.02b	0.45±0.14b
	油葵	0.68±0.11b	0.80±0.06ab	0.59±0.12b	0.47±0.08b	0.49±0.13b
	玉米	0.65±0.09b	0.73±0.05b	0.73±0.02a	0.52±0.02b	0.56±0.06ab
20—30	对照	0.84±0.13a	0.68±0.12a	0.75±0.12a	0.45±0.08a	0.61±0.18a
	大豆	0.61±0.11b	0.59±0.06ab	0.61±0.11ab	0.52±0.06a	0.61±0a
	绿豆	0.68±0.04b	0.63±0.09a	0.49±0.06b	0.47±0.08a	0.42±0.08a
	油葵	0.70±0.13b	0.45±0.06ab	0.40±0.11b	0.35±0.06b	0.38±0.02b
	玉米	0.49±0.05c	0.33±0b	0.45±0.06b	0.31±0.08b	0.49±0.10a

表 4 土壤全碳(氮)与团聚体碳(氮)的相关性分析

指标	SOC					TN				
	全土	>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm	全土	>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
SOC	全土	1.000								
	>2 mm	0.842 **	1.000							
	0.25~2 mm	0.904 **	0.973 **	1.000						
	0.053~0.25 mm	0.843 **	0.972 **	0.960 **	1.000					
	<0.053 mm	0.860 **	0.965 **	0.948 **	0.934 **	1.000				
TN	全土	0.057	0.064	0.156	0.119	0.016	1.000			
	>2 mm	0.441	0.270	0.380	0.307	0.256	0.749 **	1.000		
	0.25~2 mm	0.576 *	0.583 *	0.641 *	0.650 **	0.564 *	0.667 **	0.812 **	1.000	
	0.053~0.25 mm	0.572 *	0.596 *	0.610 *	0.670 **	0.562 *	0.483	0.730 **	0.872 **	1.000
	<0.053 mm	0.538 *	0.584 *	0.573 *	0.678 **	0.592 *	0.291	0.451	0.776 **	0.799 **

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关。

3 讨论

3.1 复播绿肥提高土壤团聚体稳定性

土壤团聚体稳定性高低可直接反映土壤抗旱保墒作用强弱。尤其是>0.25 mm 大团聚体可以提高土壤团聚体稳定性,促进土壤抗旱保墒能力。促进小团聚体向大团聚体转化是提高团聚体稳定性的重要方法^[6]。土壤 MWD 和 GMD 值越大,表示土壤团聚体的平均粒径团聚性越高,稳定性和抗侵蚀能力越强^[9]。这是因为长期绿肥翻压腐解可以产生有机胶结物质,对土壤团聚体的形成起到一定的促进作用,从而提高土粒间的黏结力,促进小团聚体向大团聚体转化,增加土壤中>0.25 mm 团聚体质量占比,改善土壤团聚体结构^[9],这与本研究结果一致。此外,种植绿肥的处理土体内根系量较

大,提高根际微生物量、根际细菌分泌物和真菌菌丝的黏结作用,也利于大团聚体的形成和稳定^[15]。综合来看,在浅层土壤中小团聚体向大团聚体转化效果好于深层土壤,可能是由于浅层土壤经过绿肥翻压,含有大量作物秸秆及绿肥等有机物料,同时有更良好的水分和空气环境,有利于微生物活动促进胶结物质产生,从而增加大团聚体组分^[16]。

绿肥品种中,豆科绿肥对土壤团聚体稳定性的提升作用强于其他绿肥。旱地麦田多数利用豆科绿肥作为绿肥,利用玉米和油葵绿肥的研究较少,可能是基于较大生物质量的绿肥对旱地麦田土壤水分的过多消耗^[17]。但是,玉米秸秆较大的生物量可以为土壤提供较多的有机质^[8]。

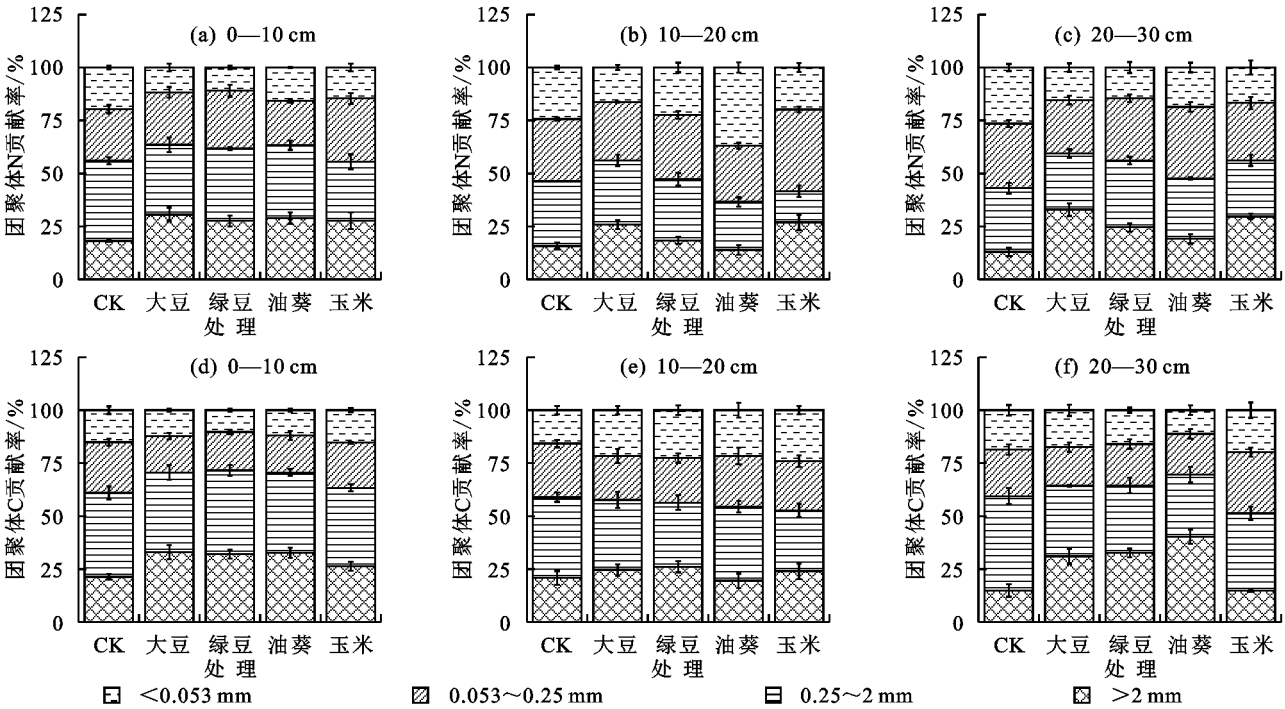


图 3 不同处理土壤团聚体有机碳和全氮对土壤总有机碳和全氮的贡献率

表 5 不同处理土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分中碳氮比

土层 深度/cm	处理	全土碳氮比	各粒级团聚体碳氮比			
			>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
0—10	对照	15.42±0.27b	13.79±0.77b	12.41±1.14a	13.73±0.36b	15.34±0.89b
	大豆	22.84±1.11a	22.64±3.25a	18.90±2.04a	23.66±3.58a	20.52±0.73a
	绿豆	21.87±6.13a	16.92±1.00ab	15.70±1.75a	16.48±2.03b	16.71±0.35b
	油葵	22.87±0.89a	16.14±1.01ab	16.43±0.79a	16.14±1.33b	13.49±0.97b
	玉米	22.96±1.57a	18.63±28.59a	18.07±2.58a	20.35±0.44a	18.36±0.80a
10—20	对照	13.40±0.95b	7.62±0.85c	9.57±0.63b	10.21±0.43b	6.93±1.44c
	大豆	21.26±6.76a	20.60±0.79a	18.49±1.95a	19.49±1.76a	19.67±0.88a
	绿豆	16.08±1.31b	14.29±1.13b	17.54±4.43a	19.00±1.41a	24.60±11.96a
	油葵	22.29±1.28a	8.51±1.13c	13.81±0.08a	11.80±2.29b	14.55±2.73b
	玉米	25.78±5.85a	14.41±4.19b	15.20±0.63a	15.01±1.80b	20.41±2.21a
20—30	对照	12.22±1.00b	5.32±1.41c	6.04±0.83c	7.55±0.33c	7.05±0.74c
	大豆	21.72±1.00a	14.73±2.71b	16.13±2.20b	14.78±2.77b	16.17±4.20a
	绿豆	16.98±1.01b	11.51±0.95b	13.16±1.78b	9.67±0.94c	14.28±5.05ab
	油葵	15.47±2.20b	11.86±1.64b	13.75±5.88b	11.31±2.83b	10.73±0.54b
	玉米	25.93±1.47a	29.02±0.35a	20.62±1.53a	24.83±1.72a	18.04±1.55a

3.2 复播绿肥提升土壤团聚体有机碳含量

土壤团聚体有机碳含量与粒级有密切关系^[7]。团聚体的形成和周转是影响土壤有机碳动态变化的主要过程,土壤有机碳也是促进团聚体形成的重要胶结物质,两者互相依存,密不可分。绿肥翻压后由于直接向土中输入外源有机质,为微生物活动提供丰富的碳源和氮源,在促进土壤有机质分解矿化、土壤养分循环和难溶性养分转化方面有积极作用,从而增加SOC含量^[18]。土壤有机碳含量易受外界有机物料的影响,在短时间内为土壤提供大量的有机物质,提升

有机碳库的固碳能力,从而达到增加土壤有机碳含量的目的^[7]。此外,翻压绿肥提供一个可供微生物活动的富含能量,富含营养物质的根际环境,提高微生物生物量碳含量^[2,19]。全土有机碳含量与MWD值和GMD值有显著的正相关关系,这可能是绿肥处理下有机碳增加的一个重要物理因素^[20]。

尽管土壤总碳含量在绿肥处理有效提升,但是土壤团聚体有机碳的分布并不完全呈现增加趋势,说明不同绿肥改变有机碳在不同团聚体中分布,这与绿肥种类的特征特性有关。一方面,不同作物在同一区域

内的净碳量存在差异,而且同一作物在不同区域之间净碳量差异也较大^[21];另一方面,相比高生物量的植株残体,较高碳氮比低生物量植株残体可明显增加土壤活性炭的含量^[22]。

3.3 复播绿肥降低土壤氮素含量

关于绿肥翻压对土壤氮素的影响结论各异。绿肥腐解全氮含量低于对照休闲,则可能是受到时间因素影响,试验周期较短,仅进行3年夏闲期翻压绿肥试验,氮肥效应或许只在长期试验中才能体现。豆科植物已成为最常见的绿肥作物,因为它们具有利用根瘤固定大气 N_2 的独特能力^[23]。因此,豆科绿肥对土壤氮素的消耗较低,对土壤氮素的贡献相对较低,豆科作物根瘤能固定一部分氮素,也有可能是豆类绿肥的碳氮比相对较低,还田后对氮素的消耗量较低。王峥等^[12]研究表明,夏闲期种植豆科绿肥显著提高土壤剖面硝态氮的含量,并在160 cm左右的深层有明显的累积峰,该研究中施用的肥料为豆科专用肥,与本研究不同。也有研究^[24]指出,旱地麦田翻压豆科绿肥4年后,土壤全氮含量并没有明显变化。虽然不同研究地区引入绿肥对土壤全氮的影响效果不一,但在等氮水平下,在夏闲期种植绿肥均导致土壤矿化氮的提高。玉米等非豆科作物对氮素的消耗最大,可能是玉米秸秆碳含量较高导致较高的碳还田量使得短期内微生物消耗氮素来平衡土壤碳氮比。非豆科作物具有更好的吸氮能力,因此种植后容易导致土壤出现一个氮亏缺状态,另外由于具有较高的碳氮比,其残余分解时可能造成土壤氮固定。本研究也出现油葵和玉米绿肥降低土壤氮素的现象。因此,生产上复播绿肥可以替代33%的氮肥施用量,供小麦植株生长^[25]。此外,土壤氮素降低也可能是翻压绿肥促进小麦植株对氮素的吸收而导致的。旱地麦田复播绿肥关于不同绿肥作物秸秆和土壤之间碳和氮的关联机制还有待于进一步定位研究和分析。总体来讲,这与翻压年限、绿肥种类和试验田土壤性状也有很大关系。本研究不同处理均在同一氮素水平,仅在小麦播前施纯氮 225 kg/hm^2 (小麦生育期需氮量),未考虑绿肥吸收等因素。此外,本研究土壤氮素测定在小麦收获期测定,绿肥翻压腐解后和小麦播种前的氮素状态对进一步明确绿肥对土壤氮的调控机制仍需深入研究。

同样的,土壤全氮含量在团聚体中也呈现下降趋势。刘小粉等^[16]在水稻田翻压紫云英的研究发现,绿肥处理均使 $0.25\sim 2,<0.05\text{ mm}$ 团聚体全氮含量降低,对 $>2,0.05\sim 0.25\text{ mm}$ 团聚体全氮含量影响不

显著。土壤氮素在团聚体中的分布受到农田系统、施肥以及绿肥种类、作物生长吸收等多种因素的影响。

3.4 复播绿肥增加土壤碳氮比

碳氮比可以反映土壤碳固持的有效性,常作为一个重要参考指标。本研究中,不同绿肥品种均增加土壤碳氮比,这与土壤有机碳增加和氮素降低有直接关系。大豆和玉米对土壤碳氮比的增加作用最明显。也有研究^[16]指出,翻压绿肥对土壤团聚体碳氮比无显著影响。从本研究结果来看,对照处理 $0\sim 30\text{ cm}$ 土壤碳氮比在 $12.22\sim 15.42$,复播绿肥后碳氮比在 $15.47\sim 25.93$,可见绿肥翻压对旱地麦田土壤碳氮比的调控作用有很大潜力。而玉米作为禾本科植物较高的碳氮比使得有机物矿化较困难或速度很慢,造成微生物群落对氮素的消耗。因此,玉米在增碳的同时对氮素消耗的弊端可能需要较高的氮肥来弥补。豆科绿肥在与根瘤菌互作形成根瘤后进行共生固氮,减少土壤氮素消耗,从而调控土壤碳氮比,因此大豆对调控土壤碳氮比具有显著意义。

4 结论

与对照现相比,连续3年翻压绿肥均显著提高旱地麦田 $0\sim 30\text{ cm}$ 土壤大团聚体占比,土壤团聚体稳定性提高。其中,大豆绿肥对土壤团聚体稳定性增加最明显。

大豆和玉米对土壤有机碳的提升作用较明显。大豆在提高土壤团聚体有机碳含量具有显著作用。复播绿肥均使各土层全氮含量降低,其中豆类绿肥与对照的全氮含量差异不显著,油葵和玉米对土壤全氮的降低程度较大。复播绿肥 $0\sim 10\text{ cm}$ 土壤大团聚体有机碳和全氮对土壤总有机碳、全氮贡献率最大,达 $54.63\%\sim 72.22\%$ 和 $55.04\%\sim 74.11\%$ 。旱地麦田翻压绿肥提升土壤碳氮比,玉米和大豆增加最明显。

总体表明,旱地麦田复播大豆绿肥有利于增加土壤大团聚体含量,提高团聚体有机碳含量及贡献率,是旱地麦田土壤增碳保氮的有效模式。

参考文献:

- [1] 张晓琪,景豆豆,杨珍平,等.绿肥苜蓿合理还田提高旱地小麦产量及土壤养分研究[J].华北农学报,2019,34(增刊1):221-227.
- [2] 黄璐,李廷亮,李顺,等.旱地冬小麦夏闲期种植不同豆科绿肥对还田养分和土壤有机碳、氮组分的影响[J].生态学杂志,2022,41(12):2335-2343.
- [3] 李忠义,张静静,蒙炎成,等.绿肥还田腐解特征及培肥地力研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(22):14-18.
- [4] 白金顺,曹卫东,包兴国,等.长期绿肥翻压对西北旱地小麦籽粒矿质元素含量的影响[J].光谱学与光谱分析,

- 2017, 37(6):1847-1851.
- [5] 李红燕, 胡铁成, 曹群虎, 等. 旱地不同绿肥品种和种植方式提高土壤肥力的效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5):1310-1318.
- [6] 谢钧宇, 曹寒冰, 孟会生, 等. 不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3):274-290.
- [7] 白璐, 蒋福祯, 曹卫东, 等. 麦后复种绿肥对土壤有机碳及其固持特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4):148-154.
- [8] 乔鑫鑫, 李乾云, 王艳芳, 等. 豆—麦复种模式对豫西丘陵区土壤团聚体及碳氮含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3):145-153.
- [9] 王慧, 韩上, 唐杉, 等. 紫云英翻压还田对稻田土壤团聚体组成及其碳氮的影响[J/OL]. 土壤学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20220407.0618.002.html>.
- [10] 陈姣, 张池, 陈玉佩, 等. 不同绿肥和覆膜措施对渭北旱塬冬小麦产量和土壤水分动态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12):2136-2148.
- [11] 马爱平, 崔欢虎, 亢秀丽, 等. 不同海拔夏闲期压青茬口对麦田水分及水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4):249-255.
- [12] 王峥, 梁颖, 姚鹏伟, 等. 绿肥播前施肥和翻压方式对旱地麦田土壤水肥性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3):199-126.
- [13] Zhang D B, Zhang C, Ren H, et al. Trade-offs between winter wheat production and soil water consumption via leguminous green manures in the Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2021, 272: e108278.
- [14] 包明, 何红霞, 马小龙, 等. 化学氮肥与绿肥对麦田土壤细菌多样性和功能的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(3):734-743.
- [15] 郑楠, 邵阳, 罗敏, 等. 土壤团聚体制备方法对其稳定性及固碳潜力评价的影响研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6):2821-2827.
- [16] 刘小粉, 王清涛, 白双宇, 等. 绿肥根茬还田和化肥用量对土壤团聚性及碳氮分布的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3):220-226.
- [17] 张少宏, 王俊, Rajan G, 等. 黄土高原绿肥田闲种植的水分与产量效应: Meta 分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(11):1879-1892.
- [18] 程会丹, 鲁艳红, 聂军. 减量化肥配施紫云英对稻田土壤碳、氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6):1259-1270.
- [19] Ma D K, Yin L N, Ju W L, et al. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China[J]. Field Crops Research, 2021, 266: e108146.
- [20] Kamran M, Huang L, Nie J, et al. Effect of reduced mineral fertilization (NPK) combined with green manure on aggregate stability and soil organic carbon fractions in a fluvo-aquic paddy soil[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 211: e105005.
- [21] 余玮, 黄璜, 官春云, 等. 我国主要农作物生产碳汇结构现状与优化途径[J]. 中国工程科学, 2016, 18(1):114-122.
- [22] Zhou G P, Cao W D, Bai J S, et al. Co-incorporation of rice straw and leguminous green manure can increase soil available nitrogen (N) and reduce carbon and N losses: An incubation study[J]. Pedosphere, 2020, 30(5):661-670.
- [23] Li T, Gao J S, Bai L Y, et al. Influence of green manure and rice straw management on soil organic carbon, enzyme activities, and rice yield in red paddy soil[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: e104428.
- [24] Yao Z Y, Zhang D B, Liu N, et al. Dynamics and sequestration potential of soil organic carbon and total nitrogen stocks of leguminous green manure-based cropping systems on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191:108-116.
- [25] Amede T, Legesse G, Agegnehu G, et al. Short term fallow and partitioning effects of green manures on wheat systems in East African highlands [J]. Field Crops Research, 2021, 272: e108278.