

DOI: 10.12357/cjea.20250586

CSTR: 32371.14.cjea.20250586

李燕楠, 张振宇, 秦树平, 李晓欣, 李红军, 张玉铭, 胡春胜, 张丽娟, 董文旭, 刘秀萍, 郑普山. 长期施氮耦合短期玉米间作豆科作物对土壤团聚体组成及碳氮分布的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(9): 1831–1846

LI Y N, ZHANG Z Y, QIN S P, LI X X, LI H J, ZHANG Y M, HU C S, ZHANG L J, DONG W X, LIU X P, ZHENG P S. Effects of long-term different nitrogen application rates coupled with short-term maize||legume crop intercropping on soil aggregate composition and carbon-nitrogen distribution[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(9): 1831–1846

长期施氮耦合短期玉米间作豆科作物对土壤团聚体组成及碳氮分布的影响^{*}

李燕楠^{1,2}, 张振宇^{2,3}, 秦树平², 李晓欣^{2**}, 李红军², 张玉铭^{2**}, 胡春胜²,
张丽娟^{1**}, 董文旭², 刘秀萍², 郑普山⁴

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院 保定 071001; 2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省土壤生态学重点实验室 石家庄 050022; 3. 河北大学生命科学学院 保定 071002; 4. 山西农业大学资源环境学院 太原 030031)

摘 要: 华北平原土地复种指数高、种植结构单一、不具备休耕条件以及农业生产中长期“重用轻养”, 导致生物多样性降低、养分转化受阻、有机碳和全氮含量降低、结构变差等一系列耕层土壤退化问题。本研究依托中国科学院栾城农业生态系统试验站始于2003年的小麦-玉米轮作肥料定位试验, 2022年玉米季通过裂区组开展了玉米单作和玉米||大豆(牧草绿肥兼用品种‘汾豆牧绿2号’)间作的对比试验, 研究长期不同施氮量下玉米间作豆科作物对土壤团聚体组成及其稳定性、有机碳和全氮在团聚体中分布的影响, 阐释间作体系中种间互作、根土互作对土壤碳氮物理保护作用的影响, 为发展“用养结合”的绿色种植技术提供参考。肥料试验设6个施氮水平, 每年施纯氮量为0(N₀)、100(N₁₀₀)、200(N₂₀₀)、300(N₃₀₀)、400(N₄₀₀)和600 kg·hm⁻²(N₆₀₀)。2024年9月玉米灌浆期采集作物根际土和非根际土, 分析其团聚体组成及有机碳和全氮含量。研究结果表明, 施氮量对团聚体组成及其稳定性的影响弱于种植方式, 施氮量变化只引起间作玉米(FM)粒级≥2 mm的粗大团聚体破碎率和稳定率产生显著变化, 大豆根际土(F)、单作玉米根际土(M)和非根际土(B)的团聚体稳定性在不同施肥处理间均无显著差异; 各施肥处理下, 与非根际土相比, 根际土粒级≥2 mm粗大团聚体破碎率降低、稳定率提高; 间作降低了玉米根际土的粗大团聚体破碎率, 以N₄₀₀施肥处理下FM的粗大团聚体稳定率最高(39.3%)。表明适宜施氮有利于提高间作体系土壤团聚体稳定性。施氮可有效提升土壤有机碳和全氮含量, 但随施肥量增加土壤氮素的提升幅度在间作和单作间存在差异, 间作更有利于提升低氮处理土壤碳氮含量。有机碳和全氮在大团聚体中的含量高于微团聚体和粉黏粒, 其中粒级0.25~2 mm的细大团聚体是土壤碳氮的主要贡献者, 其对土壤有机碳和全氮的贡献率分别为54.8%~80.0%和60.6%~69.3%。间作提高了大团聚体碳氮含量, 特别是对粗大团聚体碳氮影响最为显著, 说明种植方式的改变首先影响的是碳氮在大团聚体中的分布。由此可见, 玉米与豆科作物间作提高了土壤大团聚体含量, 增加了土壤团聚体稳定性及有机碳和全氮含量, 有利于促进土壤碳氮固持。

^{*} 国家重点研发计划项目(2022YFD1901303, 2022YFD1500302)和河北省重点研发计划项目(22326410D)资助

^{**} 通信作者: 李晓欣, 主要研究方向为农田生态与环境效应, E-mail: xiaoxin-li@sjziam.ac.cn; 张玉铭, 主要研究方向为农田生态系统养分循环与地力培育, E-mail: ymzhang@sjziam.ac.cn; 张丽娟, 主要研究方向为农田生态系统养分循环, E-mail: lj_zh2001@163.com
李燕楠, 主要研究方向为农田生态系统养分循环。E-mail: 15632300949@163.com

收稿日期: 2025-06-26 接受日期: 2025-08-13

^{*} This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFD1901303, 2022YFD1500302) and the Key Research and Development Program of Hebei Province (22326410D).

^{**} Corresponding authors: LI Xiaoxin, E-mail: xiaoxin-li@sjziam.ac.cn; ZHANG Yuming, E-mail: ymzhang@sjziam.ac.cn; ZHANG Lijuan, E-mail: lj_zh2001@163.com

Received Jun. 26, 2025; accepted Aug. 13, 2025

<http://www.ecoagri.ac.cn>

关键词: 玉米; 豆科作物; 间作; 土壤有机碳; 土壤全氮; 土壤团聚体

中图分类号: S344.2; S365

Effects of long-term different nitrogen application rates coupled with short-term maize||legume crop intercropping on soil aggregate composition and carbon-nitrogen distribution^{*}

LI Yannan^{1,2}, ZHANG Zhenyu^{2,3}, QIN Shuping², LI Xiaoxin^{2**}, LI Hongjun², ZHANG Yuming^{2**}, HU Chunsheng², ZHANG Lijuan^{1**}, DONG Wenxu², LIU Xiuping², ZHENG Pushan⁴

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Soil Ecology, Shijiazhuang 050022, China; 3. College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China; 4. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: The North China Plain faces a series of topsoil degradation issues, including reduced soil biodiversity, impeded nutrient transformation, decreased organic carbon and nitrogen contents, and deteriorated soil structure, owing to the high multiple cropping index, monoculture cropping, lack of fallow periods, and long-term emphasis on production over conservation in agricultural practices. Based on a long-term fertilization experiment initiated in 2003 in a wheat-maize rotation system at the Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station, Chinese Academy of Sciences, a split-plot design was implemented from the 2022 maize season to compare monoculture maize with maize intercropped with a legume ('Fendoumulv No. 2', a dual-purpose soybean variety for forage and green manure). This study investigated the effects of long-term nitrogen application combined with maize||soybean intercropping on soil aggregate composition, stability, and distribution of organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) within aggregates. This study aimed to clarify how interspecific and root-soil interactions in an intercropping system contribute to the physical protection of soil carbon and nitrogen, thereby supporting the development of green technologies that integrate land use with soil conservation. The experiment included six nitrogen application rates: 0 (N0), 100 (N100), 200 (N200), 300 (N300), 400 (N400), and 600 kg(N)·hm⁻² (N600). During the maize grain-filling stage in September 2024, rhizosphere and non-rhizosphere soil samples were collected to analyze the aggregate composition and SOC and TN contents. The results showed that fertilization had a weaker influence on aggregate composition and stability than the cropping pattern. Significant changes in the fragmentation and stability rates of coarse macroaggregates (≥ 2 mm) were observed only in the rhizosphere soil of intercropped maize (FM). No significant differences were detected across the nitrogen application rates in the rhizosphere soils of the intercropped soybean (F) and monocropped maize (M), or bulk soil (B). Across all nitrogen application rates, rhizosphere soils (FM, F, and M) showed reduced fragmentation and increased stability of coarse macroaggregates (≥ 2 mm) compared to non-rhizosphere soils. Intercropping reduced the fragmentation rate in the maize rhizosphere soil, with the highest stability (39.3%) occurring under the N400 treatment, indicating that appropriate nitrogen application improved aggregate stability in intercropping systems. Nitrogen application enhanced the soil SOC and TN contents, but the extent of the increase differed between intercropping and monoculture under high nitrogen inputs. Intercropping was more beneficial for increasing soil carbon and nitrogen contents under low nitrogen conditions. SOC and TN were mainly stored in macroaggregates, particularly in fine macroaggregates (0.25–2 mm), which contributed 54.8%–80.0% of SOC and 60.6%–69.3% of TN. Intercropping increased the SOC and TN contents within macroaggregates, particularly in coarse macroaggregates, suggesting that changes in cropping practices primarily affect the distribution of carbon and nitrogen in larger aggregates. In conclusion, maize||legume intercropping enhanced the content and stability of macroaggregates, increased SOC and TN sequestration, and promoted the physical protection of soil organic matter.

Keywords: maize; leguminous crops; intercropping; soil organic carbon; soil total nitrogen; soil aggregate

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其含量及粒级分布不仅影响作物生长发育,亦对土壤物理、化学及生物等一系列过程产生重要影响。土壤团聚体是土壤碳氮赋存与固持的载体,其形成及稳定性与土壤碳氮保蓄与供应密切相关^[1-2],对土壤肥力的培育与发挥至关重要,是评价土壤质量的重要指标之一^[3-4]。土壤碳氮是土壤质量和功能的核心,是土壤肥力的重要物质基础^[5-6]。土壤团聚体的形成和碳

氮保蓄是两个互相促进的过程:一方面,土壤碳氮作为土壤团聚体形成的胶结物质,对土壤团聚体稳定性具有显著影响^[7];另一方面,稳定的团聚体能够对赋存于其中的碳氮形成有效的物理化学保护,导致碳氮与生物的空间隔绝,使之避免受到土壤微生物的降解,是土壤碳氮保蓄的重要机制。通常大团聚体(≥ 0.25 mm)能够储存更多的有机碳,但是容易被破坏,形成微团聚体(< 0.25 mm)。微团聚体由于粒径

小,比表面积大,表面吸附能力强,对有机碳具有较强的物理保护作用,被认为是碳和养分固存的主要场所^[8],这也是团聚体中碳氮含量随粒径减小呈增加趋势的主要原因。研究表明,作物残茬输入土壤后首先停留在大团聚体中^[9],土壤大团聚体使微生物更容易接触有机物,其有机碳的矿化程度高于微团聚体,且大团聚体中有机碳主要为易分解矿化的活性有机碳,其有机碳更年轻、更易矿化,有机碳矿化的同时会释放出氮、磷、硫等活性养分^[10-11],因此,大团聚体赋存的碳氮含量越多,土壤的供肥能力越强; $<0.25\text{ mm}$ 微团聚体中有机碳主要以稳定的腐殖质碳占优势,且其中的胶体及无机物质与有机碳紧密结合,由于不断积累而总有机碳含量升高,提高了土壤有机碳的保蓄能力。

土壤团聚体稳定与更新周转及其对碳氮的保蓄受到作物种植体系、施肥制度、耕作措施、秸秆还田方式等诸多因素的影响^[12-14]。现代集约化农业通过简化种植体系、增加无机肥料来满足对农产品日益增长的需求,然而,简化的单一种植体系易导致农田生物多样性丧失、碳氮循环受阻、土壤质量退化等一系列问题,威胁着粮食安全和农业可持续发展。近年来,间作已成为农业实践多样化的一种有效策略,是通过增加田间作物种类和遗传多样性促进农业可持续生产的一种方式。与单一种植体系相比,间作利用生态位分化和物种互作的正效应提高粮食产量和养分利用效率,被认为是改善耕地质量和保障粮食安全的重要措施^[15]。研究表明,间作可以增强土壤团聚体稳定性,提高土壤碳氮含量^[16-17],这与间作体系中种间互作促进根系分泌物(总糖、有机酸)增加、为土壤碳氮循环提供物质基础有关^[18-19],特别是豆科(Leguminosae)与禾本科(Poaceae)作物间作的协同效应已得到广泛证实。孙涛等^[13]在东北黑土区的研究结果表明,玉米(*Zea mays*)与大豆(*Glycine max*)间作较玉米单作显著提高了土壤团聚体平均重量直径和平均几何直径,提高了土壤水稳性大团聚体含量及其有机碳和全氮对土壤总有机碳和全氮的贡献率,进而显著提高了土壤有机碳和全氮含量。赵吉霞等^[19]在红壤区坡耕地的研究表明,玉米||大豆间作显著提高了水稳性大团聚体含量及其稳定性。尽管已有大量研究表明间作在改善土壤质量方面存在众多优势,但受土壤类型、气候特征以及作物种类搭配等影响,不同间作模式对土壤团聚体有机碳和全氮含量的影响及其差异仍需深入研究。覆盖作物作为一类填闲作物与主粮作物间作,可显著

增加土壤中碳和氮的截获,从而提高作物产量和土壤质量^[20-21]。覆盖作物还能凭借其发达的根系吸收和活化深层土壤的养分和难溶性养分,并将其富集于耕层土壤以便作物吸收和利用^[22-23]。豆科作物由于自身的固氮作用,能够有效固定空气中的氮,作为覆盖作物与禾本科作物间作时,其所固定氮素的一部分可以通过各种途径转移并被禾本科作物所利用,从而提高氮素利用效率^[24-27]。根际是养分、水分和有害物质进入作物系统,参与食物链物质循环的必经门户,是植物-土壤-微生物相互作用的重要界面,禾本科与豆科作物间作可增强两种作物的种间根系互作,在根际土壤中形成庞大的根-土-微生物生命共同体,促进土壤有机质分解和养分转化,影响植物对养分的吸收利用。然而,覆盖作物与主粮作物间作体系的种间互作、根土互作及根际沉积碳对土壤团聚体与碳氮分布影响的研究尚存在不足,豆科作物与主粮作物间作在不同施氮水平下对团聚体碳氮分配的特异性影响缺乏系统比较,与施氮量的交互作用调控团聚体碳氮保蓄的量化关系尚未明确,有待进一步研究和探讨。

华北平原是我国主要的粮食生产基地之一,承载着农业资源高效利用、粮食安全、环境友好的生态经济功能。小麦(*Triticum aestivum*)-玉米轮作是本区域主要种植模式。该区域的土地复种指数高、种植结构单一、不具备休耕条件以及农业生产中长期“重用轻养”,导致生物多样性降低、养分转化受阻、有机碳和全氮含量降低、结构变差、水肥保蓄能力变弱等一系列耕层土壤退化问题,已成为制约本区域粮食持续高产、稳产的障碍因素,区域粮食生产能力的进一步提高和农业持续发展受到严峻挑战。基于上述系列问题,本研究从“用养结合”角度,聚焦玉米间作豆科作物与施氮量的交互作用,探究其对土壤团聚体组成、稳定性及碳氮分布的影响,明确碳氮在团聚体中的分配规律,解析施氮量对间作效应的调控机制,旨在为优化间作种植模式与氮肥管理提供科学依据,进而为提升区域农田生态系统可持续性、推动农业绿色发展提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及试验设计

试验地点位于中国科学院栾城农业生态系统试验站($114^{\circ}40'E$, $37^{\circ}50'N$, 平均海拔 50.1 m)。该站位于华北太行山前平原中部,属暖温带半湿润季风气候,年平均气温 $12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,降雨主要集中在7—9月,雨

热同期,无霜期 200 d 左右。供试土壤类型为潮褐土,种植制度为冬小麦-夏玉米轮作。

基于 2003 年开始的不同施氮水平肥料定位试验,本研究于 2022 年玉米季选择牧草绿肥兼用型大豆品种‘汾豆牧绿 2 号’作为豆科模式作物开展玉米||豆科作物间作试验。‘汾豆牧绿 2 号’是由半野生大豆(*Glycine gracilis*)品种‘汾半野 2 号’与栽培大豆品种‘晋豆 21 号’杂交而来,适应性强,适种范围广,具有蔓生、耐荫、耐旱、生物量高等特点,适于作为以肥田为目的的覆盖作物与玉米间作。肥料定位试验共设置 6 个施氮处理,每年施纯氮量为 0 (N0)、100 (N100)、200 (N200)、300 (N300)、400 (N 400) 和 600 kg·hm⁻² (N600),每个处理 3 次重复,共计 18 个小区。每个小区长 18 m、宽 9 m,各小区随机排布。轮作过程中,小麦季和玉米季施氮量一致,各占全年用量的 1/2;氮肥选用尿素,小麦季分别于底肥和拔节期施用,用量各为全季的一半;玉米季于大喇叭口期一次施入。所有处理磷肥用量相同,折合 65 kg(P)·hm⁻²·a⁻¹,磷肥选用过磷酸钙,在小麦季全部作为基肥一次性施入。研究区土壤钾含量充裕,农业管理中实施了小麦-玉米两季秸秆全量还田措施,因此本试验不施用钾肥。2022 年 6 月开始,在各处理施氮量不变的情况下采用裂区组试验开展了玉米单作和玉米||大豆间作的对比研究。玉米采用 60~120 cm 宽窄行种植,玉米播种密度 67 500 株·hm⁻²;间作处理在玉米的宽行种植 4 行大豆,行距 20 cm,距玉米行 30 cm,播量为 37.5 kg·hm⁻²。

1.2 样品采集与测定方法

1.2.1 样品采集

2024 年 9 月玉米灌浆期采集作物根际土和非根际土,以检测长期不同施肥处理下在玉米种植体系中引入豆科作物,短期的根土互作和种间互作对土壤团聚体组成及碳氮分布的影响。每个小区随机采集 3 株玉米挖出根茬,利用抖根法收集黏附于玉米根系表面的土壤颗粒作为根际土,单作玉米根际土以 M 表示,间作玉米根际土以 FM 表示;间作处理中,在采样玉米根茬对应处收割靠近玉米的一行大豆,亦采用抖根法收集黏附于大豆根表面的土壤颗粒作为根际土,以 F 表示;非根际土在单作玉米宽行的中间部位用土钻采集 5 个样点的 0~20 cm 土样,以 B 表示。所采土样自然风干后作为待测样品。

1.2.2 机械稳定性团聚体测定

采用干筛法^[28]测定。称取上述待测土样 200 g,放入套筛的最上层土筛中,套筛由上到下孔径依次

为 2、0.25 和 0.053 mm,底层安放底盒,以收取粒径 <0.053 mm 的土壤,套筛顶部有筛盖。装好土壤后,用振荡式筛分仪在最大功率下振荡 10 min,从上部依次取筛,将各级网筛的土样分别收集称重,得到粒径 ≥2 mm (粗大团聚体)、0.25~2 mm (细大团聚体)、0.053~0.25 mm (微团聚体) 和 <0.053 mm (粉黏粒) 的机械稳定性团聚体质量。

1.2.3 水稳性团聚体测定

采用湿筛法^[29]测定。按照干筛后的土壤团聚体分布比例,称取相当于 50 g 烘干土的风干土样,平铺于套筛最大孔径的土筛上,套筛孔径同干筛法。调整桶内水面高度,使筛子移动到最高位置时最上一层筛子中的土样淹没在水面之下。先在水面下浸泡 5 min,然后以上下 3 cm 的振幅、25 次·min⁻¹ 的振荡频率振荡 2 min,将每个筛子上的水稳性团聚体分别冲洗入已称重的三角瓶内(<0.053 mm 的团聚体静置 48 h 后再收集),65 ℃ 烘干、称重;之后向每个瓶中加入 10 mol·L⁻¹ 六偏磷酸钠 10 mL 振荡 45 min,分散后分别过相应孔径的筛子,收集各级筛子上的残留物,65 ℃ 烘干,再次称重。通过换算即得到粒径 ≥2 mm (粗大团聚体)、0.25~2 mm (细大团聚体)、0.053~0.25 mm (微团聚体) 和 <0.053 mm (粉黏粒) 的水稳性团聚体质量。

1.2.4 土壤全氮和有机碳测定

采用元素分析仪 (vario MACRO cube; Elementar, Germany) 测定土壤全土和不同粒级水稳性团聚体的全氮含量,采用重铬酸钾氧化法测定全土和不同粒级水稳性团聚体的有机碳含量。

1.3 相关指标计算与数据统计分析方法

1.3.1 相关指标计算

利用干筛法和湿筛法得到的各粒级团聚数据,计算各粒级团聚体含量、粒径 ≥0.25 mm 团聚体含量、团聚体平均重量直径、团聚体结构破碎率、团聚体稳定率和团聚体养分贡献率,计算公式如下^[5,30-33]。

$$WSA_i(\%) = \frac{W_i}{W_T} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{0.25}(\%) = \frac{M_{r \geq 0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (2)$$

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \times WSA_i}{\sum_{i=1}^n WSA_i} \quad (3)$$

$$PAD(\%) = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{WSAR}(\%) = \frac{M_{\text{wr} \geq 0.25}}{M_{\text{Dr} \geq 0.25}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{CR}_i(\%) = \frac{C_i \times \text{WSA}_i}{C_T} \quad (6)$$

式中: WSA_i 为 i 粒级机械稳定性或水稳性团聚体质量百分含量 (%); W_i 为 i 粒级机械稳定性或水稳性团聚体重量 (g); W_T 为供试土壤总重量 (g); $R_{0.25}$ 为粒径 ≥ 0.25 mm 团聚体含量 (%); $M_{r \geq 0.25}$ 、 $M_{\text{wr} \geq 0.25}$ 和 $M_{\text{Dr} \geq 0.25}$ 分别为粒径 ≥ 0.25 mm 团聚体、水稳性和机械稳定性团聚体重量 (g); M_T 为团聚体的总重量 (g); MWD 为团聚体平均重量直径 (mm); n 为粒径分组的组数; X_i 为 i 粒级分组的平均直径 (mm); PAD 为团聚体结构破碎率 (%); $\text{DR}_{0.25}$ 和 $\text{WR}_{0.25}$ 分别为粒径 ≥ 0.25 mm 机械稳定性和水稳性团聚体质量百分含量 (%); WSAR 为团聚体稳定率 (%); CR_i 为 i 粒级团聚体养分对土壤养分的贡献率 (%); C_i 为 i 粒级团聚体养分含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_T 为土壤养分含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.3.2 数据分析

使用 Excel 2019 和 Origin Pro 2021 软件分别进行数据处理和图表绘制, 使用 JASP 0.19 软件进行方差分析, 采用 LSD 法和 Duncan 法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$)。

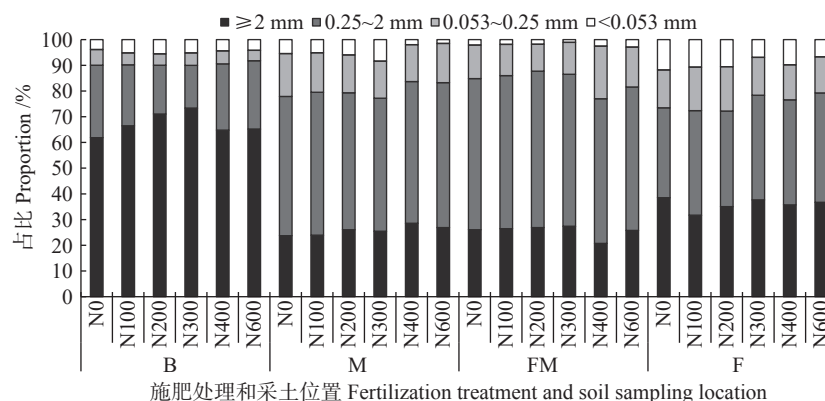
2 结果与分析

2.1 长期不同施氮量下玉米间作豆科作物对土壤机械稳定性团聚体分布特征的影响

图 1 为长期不同施氮量耦合短期玉米||大豆间作下土壤机械稳定性团聚体组成。结果表明, 各处理不同粒级团聚体分布趋势一致, 均以 ≥ 0.25 mm 粒级

的大团聚体为主, 占总土重的 72.2%~91.8%。其中, ≥ 2 mm 的粗大团聚体占总土重的 20.7%~73.4%, 0.25~2 mm 的细大团聚体占总土重的 16.6%~60.8%, 0.053~0.25 mm 的微团聚体占总土重的 4.1%~20.5%, < 0.053 mm 的粉黏粒占比仅为 1.1%~11.8%。

土壤结构主要取决于 ≥ 0.25 mm 的大团聚体含量, 其含量越多, 说明土壤团聚性越好, 团聚体越稳定^[33]。从施氮水平对土壤机械稳定性团聚体组成的影响来看, 同类型采土位置的土壤 ≥ 0.25 mm 大团聚体含量在不同施肥处理间差异不显著, 表明施氮量未对土壤团聚体组成产生显著影响。在同一施氮水平下, 作物根际土 ≥ 0.25 mm 大团聚体含量显著低于非根际土 ($P < 0.05$), 表明作物根系生长的穿透作用降低了土壤团聚体的机械稳定性。从 ≥ 0.25 mm 机械稳定性大团聚体组成来看, 根际土与非根际土之间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 非根际土以 ≥ 2 mm 的粗大团聚体为主, 其含量显著高于各类根际土 ($P < 0.05$); 根际土则以 0.25~2 mm 的细大团聚体为主, 其含量显著高于非根际土 ($P < 0.05$)。与非根际土 (B) 相比, 单作玉米根际土 (M)、间作玉米根际土 (FM) 和间作大豆根际土 (F) 的 ≥ 0.25 mm 大团聚体含量依次降低 7.6%~14.2%、2.6%~11.1% 和 12.9%~19.8%; 其中, ≥ 2 mm 粒级的粗大团聚体和 0.25~2 mm 粒级的细大团聚体含量消长不一, ≥ 2 mm 的粗大团聚体含量依次显著降低 55.9%~65.3%、57.9%~68.0% 和 37.8%~52.3% ($P < 0.05$), 0.25~2 mm 的细大团聚体含量则依次显著增加 92.1%~212.0%、108.6%~256.3% 和 24.0%~145.3% ($P < 0.05$)。这表明作物根系的生长主要造成了粗大团聚体破碎, 使更多的粗大团聚体



N0、N100、N200、N300、N400 和 N600 处理每年的施氮量分别为 0、100、200、300、400 和 600 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; B、M、FM 和 F 分别表示非根际土、单作玉米根际土、间作玉米根际土和间作大豆根际土。N0、N100、N200、N300、N400 和 N600 are treatments of annual nitrogen fertilization rates of 0, 100, 200, 300, 400 and 600 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. B, M, FM and F represent the non-rhizosphere soil, rhizosphere soil of monocropped maize, rhizosphere soil of intercropped maize and rhizosphere soil of intercropped soybean, respectively.

图 1 施氮量与种植方式对土壤机械稳定性团聚体组成的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen fertilization rate and planting pattern on the composition of soil mechanically stable aggregates

破碎成为细大团聚体和微团聚体或粉黏粒,即作物根系生长在降低机械稳定性粗大团聚体含量的同时提高了机械稳定性细大团聚体含量,二者的消长影响了机械稳定性大团聚体组成。不同作物根系对土壤团聚体组成的影响不同,大豆根际土的 ≥ 2 mm粗大团聚体含量显著高于玉米根际土($P<0.05$),但其 $0.25\sim 2$ mm细大团聚体含量则低于玉米根际土; ≥ 0.25 mm的大团聚体总含量以FM最高,其次为M,F最低。表明玉米和大豆间作增强了根系的种间互作关系,提升间作体系中玉米根际土的机械稳定性团聚体含量。

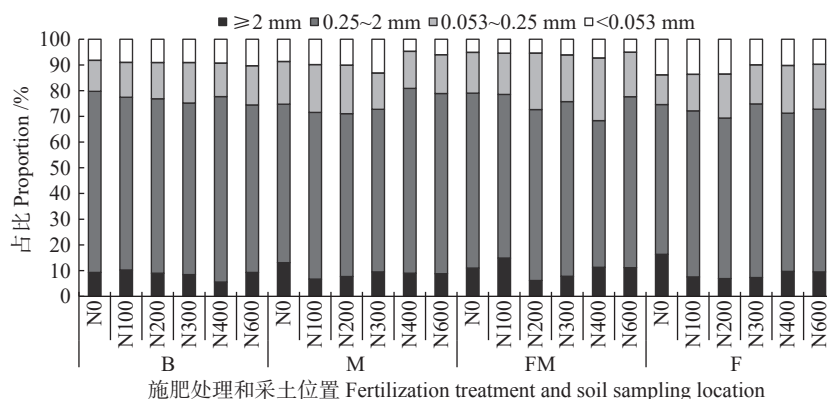
2.2 长期不同施氮量下玉米间作豆科作物对土壤水稳性团聚体分布特征的影响

图2为长期不同施氮量耦合短期玉米||大豆间作下土壤水稳性团聚体分布情况。结果表明,各处理、不同采土位置水稳性团聚体组成均以 $0.25\sim 2$ mm的细大团聚体为主,占总土重的 $57.0\%\sim 72.1\%$ 。不同施肥处理的水稳性团聚体含量与机械稳定性团聚体相比, ≥ 2 mm的粗大团聚体含量明显减少,减少幅度为 $43.7\%\sim 91.4\%$,减少幅度越大表明该粒级团聚体水稳性越差。比较图2和图1不难看出,不同施肥处理间减少幅度差异不显著,而同一施肥处理下不同采土位置的减少幅度差异显著($P<0.05$),非根际土的减少幅度显著高于各类根际土($P<0.05$)。表明作物根系生长过程中产生的分泌物以及选择性招募的微生物等的改变提高了根际土壤 ≥ 2 mm粗大团聚体水稳性。 $0.25\sim 2$ mm水稳性团聚体含量与同一粒级机械稳定性团聚体含量相比普遍增加,增加幅度为 $1.4\%\sim 301.3\%$,表明在水力作用下部分 ≥ 2 mm

的机械稳定性粗大团聚体崩塌为 $0.25\sim 2$ mm的细大团聚体。不同采土位置间 $0.25\sim 2$ mm的细大团聚体的增加幅度不尽相同,非根际土壤增加幅度显著高于根际土壤($P<0.05$)。各施肥处理下,B的增幅为 $145.7\%\sim 301.3\%$,F的增幅为 $47.2\%\sim 67.9\%$,M的增幅为 $13.7\%\sim 30.4\%$,FM仅增加 $1.4\%\sim 19.1\%$ 。表明由于作物根系的影响, ≥ 2 mm水稳性粗大团聚体的破碎率显著降低,特别是在玉米种植体系中引入豆科作物更有利于降低玉米根际土的粗大团聚体破碎率,提高间作玉米根际(FM)水稳性粗大团聚体含量。从施氮量耦合作物种植方式对水稳性团聚体组成的综合影响来看,施肥的影响低于作物根系的影响,但二者的耦合效应规律性尚不明确,主要原因可能是玉米与大豆实施间作时间太短(3年),间作体系的种间互作、根土互作效应的调控作用尚未引起土壤团聚体组成的明显变化。

2.3 长期不同施氮量下玉米间作豆科作物对土壤团聚体稳定性的影响

施肥和作物种植方式不仅对土壤团聚体分布产生影响,也会导致团聚体稳定性的变化。在作物根系穿透力的影响下根际土壤机械稳定性团聚体平均重量直径(MWD_d)显著低于非根际土壤($P<0.05$);施肥对 MWD_d 的影响相对较弱,多数情况下同一采土位置不同施肥处理间 MWD_d 无显著性差异,只有间作体系中玉米根际土(FM)不同施肥处理的 MWD_d 存在显著差异($P<0.05$),N200和N300处理高于其他施肥处理,且与N400处理差异显著($P<0.05$)(图3a)。施肥和作物种植方式对土壤水稳性团聚体平均重量直径(MWD_w)有显著影响($P<0.05$),特别是作物根际



N0、N100、N200、N300、N400和N600处理每年的施氮量分别为0、100、200、300、400和600 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; B、M、FM和F分别表示非根际土、单作玉米根际土、间作玉米根际土和间作大豆根际土。N0、N100、N200、N300、N400和N600 are nitrogen fertilization treatments, whose annual fertilization rates are 0, 100, 200, 300, 400 and 600 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. B, M, FM and F represent the non-rhizosphere soil, rhizosphere soil of monocropped maize, rhizosphere soil of intercropped maize and rhizosphere soil of intercropped soybean, respectively.

图2 施氮量与种植方式对土壤水稳性团聚体组成的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen fertilization rate and planting pattern on the composition of soil water-stable aggregates

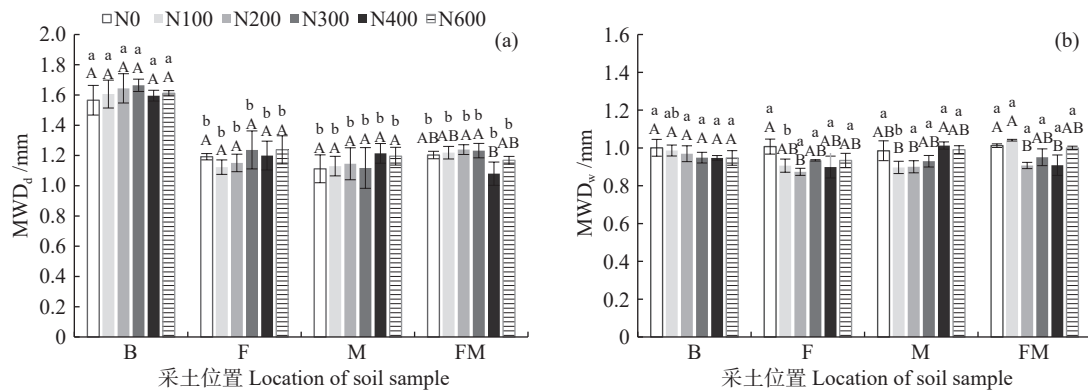


图3 施氮量与种植方式对土壤机械稳定性(a: MWD_d)和水稳性(b: MWD_w)团聚体平均重量直径的影响
Fig. 3 Effects of nitrogen fertilization rate and planting pattern on the mean weight diameters of soil mechanically stable (a: MWD_d) and water-stable (b: MWD_w) aggregates

土 MWD_w 受施肥量影响较大,但其变化规律不甚明显,基本上表现为作物根际土 N0 和 N600 施肥处理下 MWD_w 偏高(图 3b)。因间作种植时间尚短,施肥对不同种植方式下根际土 MWD_d 和 MWD_w 的影响规律尚需进一步印证和探究。

将土壤团聚体平均重量直径(MWD)与 ≥ 0.25 mm的大团聚体含量($R_{0.25}$)进行线性拟合,结果显示,无论土壤机械稳定性团聚体(图 4a)还是水稳性团聚体(图 4b),其 MWD 与 $R_{0.25}$ 之间均存在极显著正相关关系($P < 0.01$),机械稳定性团聚体 MWD 与 $R_{0.25}$ 的相关性(相关系数为 0.663 5)高于水稳性团聚体(相关系数为 0.565 2)(图 4)。说明机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的 MWD 主要由 ≥ 0.25 mm的团聚体

所组成。土壤 ≥ 0.25 mm 团聚体含量越高,团聚体 MWD 越大,土壤结构也越稳定。

团聚体的结构破碎率和稳定率是反映土壤团聚体结构稳定性的指标,结构破碎率越小和稳定率越大,代表土壤团聚体稳定性越高。表 1 显示, ≥ 2 mm 的粗大团聚体的结构破碎率均为正值,表明这部分水稳性团聚体在土壤中占比低于机械稳定性团聚体,即湿筛使该粒级的机械稳定性团聚体部分遭到破坏而成为较小粒级团聚体,即 ≥ 2 mm 的土壤团聚体水稳性较差。0.25~2 mm 的细大团聚体的结构破碎率均为负值,说明该粒级水稳性团聚体含量在土壤中的占比高于机械稳定性团聚体,即湿筛使 ≥ 2 mm 的机械稳定性团聚体崩塌为 0.25~2 mm 粒级或粒级

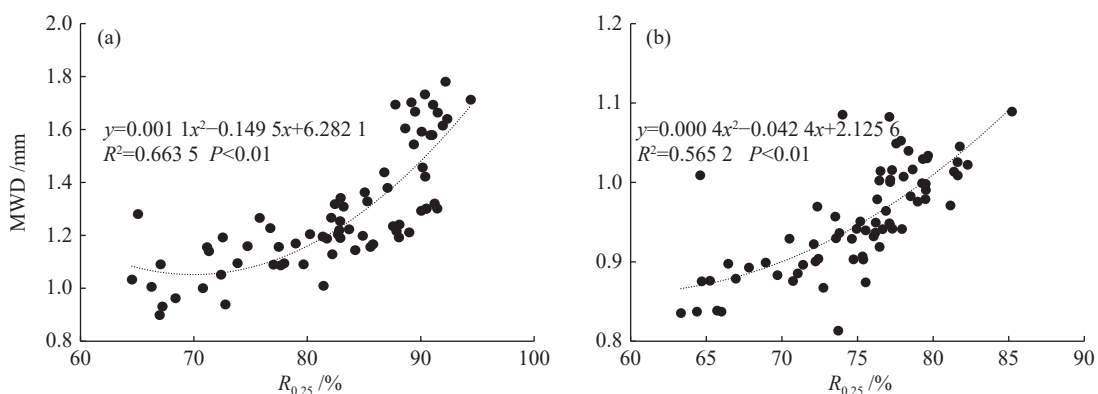


图4 土壤粒径 ≥ 0.25 mm 的机械稳定性(a)和水稳性(b)团聚体含量($R_{0.25}$)与团聚体平均重量直径(MWD)的关系
Fig. 4 Relationships between mean weight diameter of soil aggregates (MWD) and contents of mechanically stable (a) and water-stable (b) soil aggregates with ≥ 0.25 mm size ($R_{0.25}$)

表 1 不同施氮量与种植方式下土壤团聚体的结构破碎率和稳定率

Table 1 Fragmentation rates and stability rates of soil aggregates with different sizes under different nitrogen fertilization rates and planting patterns

施肥处理 Fertilization treatment	采土位置 Location of soil sample	结构破碎率 Fragmentation rate /%		稳定率 Stability rate /%	
		≥2 mm	0.25~2 mm	≥2 mm	0.25~2 mm
N0	B	83.1±46.6aA	-180.7±57.1bA	8.6±3.4aA	142.5±28.8aA
	F	57.0±13.8aA	-67.1±16.7aA	21.2±6.9aA	82.4±8.1bA
	M	56.0±17.1aA	-13.5±1.7aA	31.2±7.0aA	57.8±1.7bA
	FM	57.9±2.2aAB	-7.2±2.8aA	22.0±1.2aAB	56.2±1.5bA
N100	B	82.9±5.2aA	-309.8±82.2bA	8.6±2.7bA	202.7±40.8aA
	F	75.4±10.0aA	-61.5±16.7aA	12.8±5.0bA	83.4±6.4bA
	M	71.4±2.4aA	-16.6±3.4aA	14.1±1.2bA	57.4±1.7bA
	FM	13.0±4.2bB	-7.2±2.8aA	29.9±2.2aAB	56.2±1.5bA
N200	B	87.2±5.2aA	-505.9±84.1bA	6.3±2.6aA	297.9±40.4aA
	F	80.6±5.7aA	-70.5±9.8aA	10.2±2.4aA	92.5±4.7bA
	M	67.3±7.6aA	-20.5±0.3aA	16.1±3.7aA	59.3±4.8bA
	FM	76.3±3.9aA	-10.0±1.8aA	14.3±4.0aB	63.9±5.4bA
N300	B	87.9±4.7aA	-376.7±88.8bA	7.9±2.1aA	234.2±71.8aA
	F	76.5±11.9aA	-67.4±9.9aA	13.3±7.2aA	90.2±4.2bA
	M	70.4±14.0aA	-25.8±10.1aA	14.8±6.6aA	64.8±10.4bA
	FM	71.2±7.7aA	-15.5±1.5aA	16.8±4.4aB	66.8±5.0bA
N400	B	91.2±1.8aA	-190.5±48.1bA	4.6±0.9bA	142.6±23.5aA
	F	73.5±6.9aA	-48.2±8.2aA	14.2±4.5aB	76.9±0.4bA
	M	65.4±11.2abA	-31.5±0.6aA	18.0±5.8aB	68.6±4.9bA
	FM	36.1±1.4bB	-2.4±0.1aA	39.3±3.9aA	58.8±2.3bA
N600	B	85.8±2.0aA	-146.7±12.6bA	7.0±1.0bA	121.3±6.1aA
	F	71.3±7.6abA	-51.4±11.9aA	15.0±3.2abA	83.5±5.9bA
	M	66.6±3.3bA	-24.6±0.7aA	19.4±3.8aA	70.8±5.9bA
	FM	55.9±7.0bAB	-22.7±2.3aA	22.7±3.7aAB	63.0±7.5bA

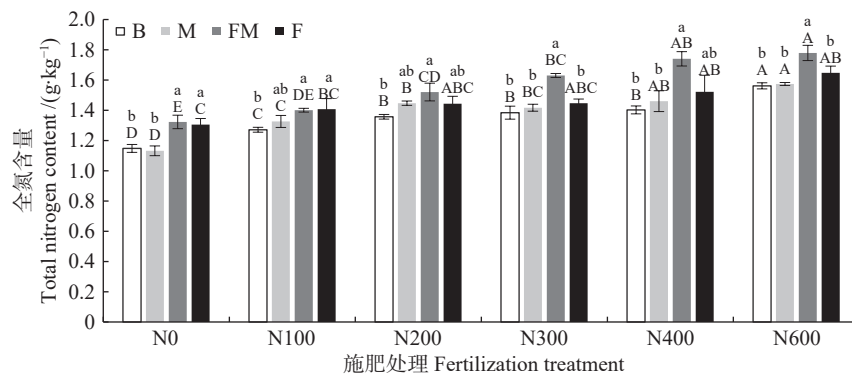
N0、N100、N200、N300、N400和N600处理每年的施氮量分别为0、100、200、300、400和600 kg·hm⁻²；B、F、M和FM分别表示非根际土、间作大豆根际土、单作玉米根际土和间作玉米根际土。不同小写字母表示同一施肥处理不同类型采土位置差异显著($P<0.05$)，不同大写字母表示同类型采土位置不同施肥处理间差异显著($P<0.05$)。N0、N100、N200、N300、N400和N600 are treatments of annual nitrogen fertilization rates of 0, 100, 200, 300, 400 and 600 kg·hm⁻², respectively. B, F, M and FM represent the non-rhizosphere soil, rhizosphere soil of intercropped soybean, rhizosphere soil of monocropped maize and rhizosphere soil of intercropped maize, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different locations of soil samples under the same fertilization treatment at $P<0.05$ level. Different capital letters indicate significant differences among different fertilization treatments in the same location of soil sample at $P<0.05$ level.

更小的团聚体。从团聚体稳定率不难看出, 0.25~2 mm 的细大团聚体稳定性远高于≥2 mm 的粗大团聚体。从施氮量和作物根系对团聚体结构破坏率和稳定性的影响来看, 施氮量的影响效果弱于作物根系的影响, 施氮量只引起间作玉米根际 (FM) 土≥2 mm 粗大团聚体结构破碎率和稳定率产生显著变化 ($P<0.05$), 其他根际土和非根际土的不同施肥处理间均无显著性差异。但各施肥处理下, 作物根系生长降低了≥2 mm 粗大团聚体结构破碎率并提高了其稳定率, 特别是间作体系中玉米根系在大多数施肥处理中对其产生了显著影响; 对于 0.25~2 mm 的细大团聚体而言, 作物根系显著降低了其稳定率并提高了其结构破碎率, 即作物根系生长不利于水稳性细大团聚体的稳定。综观施肥与作物种植方式的耦合影响效应, 以 N400 施肥处理中 FM 的粗大团聚体稳定率最高, 达 39.3%, 说明适宜施氮有利于提高间

作体系土壤团聚体稳定性。

2.4 长期不同施氮量下玉米间作豆科作物对土壤全氮及团聚体氮库的影响

图 5 为长期不同施氮量与短期种植方式改变对作物根际与非根际土壤全氮含量的影响。结果表明, 随着施氮量增加土壤全氮含量逐渐增加, 但其增幅随氮肥施用量的不同而存在差异: 所有类型作物根际土和非根际土全氮均以 N600 最高、N0 最低, 其中, B、M 和 FM 的 N600 显著高于 N300 ($P<0.05$), 且 M、FM 和 F 的 N600 与 N400 间无显著差异; 4 个采土位置的 N400 与 N300 间亦无显著差异, B 和 M 在 N200、N100 和 N0 间存在显著差异 ($P<0.05$); F 的 N600 和 N400 显著高于 N0 ($P<0.05$), 但与其他施肥处理间无显著差异, 且二者之间亦无显著差异。对于长期实施夏玉米单作而言, 与 N0 相比, 各施肥处理的非根际 (B) 土壤全氮含量增加 10.8%~36.1%,



N0、N100、N200、N300、N400 和 N600 处理每年的施氮量分别为 0、100、200、300、400 和 600 kg·hm⁻²; B、M、FM 和 F 分别表示非根际土、单作玉米根际土、间作玉米根际土和间作大豆根际土。不同小写字母表示同一施肥处理不同类型采土位置间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同类型采土位置不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。N0, N100, N200, N300, N400 and N600 are treatments of annual nitrogen fertilization rates of 0, 100, 200, 300, 400 and 600 kg·hm⁻², respectively. B, M, FM and F represent the non-rhizosphere soil, rhizosphere soil of monocropped maize, rhizosphere soil of intercropped maize and rhizosphere soil of intercropped soybean, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different sampling locations under the same fertilization treatment at $P < 0.05$ level. Different capital letters indicate significant differences among different fertilization treatments in the same sampling location at $P < 0.05$ level.

图5 施氮量与种植方式对土壤全氮含量的影响

Fig. 5 Effect of nitrogen fertilization rate and planting pattern on the contents of soil total nitrogen

玉米根际 (M) 增加 17.1%~39.0% ($P < 0.05$); 对于由玉米单作改为玉米||大豆间作而言, 作物根际土壤全氮含量随施氮量增加的增幅有所降低, 与 N0 相比, 各施肥处理的玉米根际土 (FM) 全氮含量增加 5.9%~34.5%, 大豆根际土 (F) 增加 7.8%~26.2%。这从另一个侧面说明, 玉米体系中引入豆科作物, 在低肥力土壤中更能发挥豆科作物的固氮潜力, 从而削弱了土壤全氮含量随施氮量增加的幅度。

在相同施肥处理下, 作物根际土壤全氮含量高于非根际 (N0 处理的 M 除外), 这表明作物根系吸收养分的过程中引起了土壤溶液的质流, 使更多的氮素聚集于根区; 豆科作物固氮亦会提高根际土壤全氮含量。根际土与非根际土之间全氮含量的差异随施肥量的不同而不同: 与非根际土 (B) 相比, 从 N0 到 N600, M 的全氮增量依次为 -1.4%、4.3%、6.6%、2.4%、4.1% 和 0.8%, N0 处理的 M 低于 B, 主要是长期不施肥造成土壤贫氮, 玉米根系吸收导致根域养分匮乏而外围土壤氮素不能及时通过质流补充的结果。FM 较 B 的全氮含量增量随施肥量变化依次为 15.3%、10.2%、12.1%、17.8%、24.1% 和 13.9%, FM 较 B 的全氮含量增幅高于 M, 表明豆科作物引入玉米种植体系提高了玉米根际土壤氮素含量, 可能是作物根系种间互作的结果。F 较 B 的全氮增量从 N0 到 N600 依次为 13.7%、10.7%、6.4%、4.5%、8.5% 和 5.5%, 其增幅整体呈随施氮量增加而降低趋势, 这也进一步说明豆科作物根系固氮效果有随施氮量增加而降低的趋势。

从施肥与种植方式对各粒级土壤团聚体全氮含量的影响来看 (表 2), 各处理的不同粒级土壤团聚体全氮含量由高到低基本为粗大团聚体 > 细大团聚体 > 粉黏粒 > 微团聚体, 所有处理不同粒级土壤团聚体全氮含量平均值为粗大团聚体 1.51 g·kg⁻¹、细大团聚体 1.41 g·kg⁻¹、粉黏粒 1.32 g·kg⁻¹、微团聚体 1.18 g·kg⁻¹, 各粒级团聚体间全氮含量存在显著差异 ($P < 0.05$)。从施肥对土壤团聚体全氮含量的影响来看, 随着施氮量的增加各粒级团聚体全氮含量整体呈增加趋势。对于 ≥ 2 mm 的粗大团聚体, 施肥较无肥处理全氮含量增幅为 B 6.7%~31.9%、F 13.1%~25.5%、M 19.5%~37.2%、FM 7.5%~36.6%, 其平均增量依次为 19.7%、18.1%、29.5% 和 21.0%; 对于 0.25~2 mm 的细大团聚体, 施肥较无肥处理全氮含量增幅为 B 15.6%~36.7%、F 12.9%~26.4%、M 15.0%~36.7%、FM 7.0%~35.2%, 其平均增量依次为 23.5%、18.4%、24.4% 和 23.0%; 对于 0.053~0.25 mm 的微团聚体, 施肥较无肥处理全氮含量增幅为 B 14.9%~35.1%、F 11.2%~23.4%、M 20.7%~34.8%、FM 9.1%~31.8%, 其平均增量依次为 22.1%、16.4%、26.3% 和 18.2%; 对于 < 0.053 mm 的粉黏粒, 施肥较无肥处理全氮含量增幅为 B 8.5%~16.9%、F 6.6%~21.3%、M 12.7%~39.2%、FM 6.6%~23.0%, 其平均增量依次为 12.9%、12.5%、27.6% 和 15.7%。由此可见, 不同粒级团聚体全氮含量均受施肥和种植方式的影响, 施肥提高了团聚体全氮含量, 但提升幅度因种植方式的不同而存在差异。间作种植方式 (F 和 FM) 下, 施肥导致土壤团聚

表 2 施氮量与种植方式对不同粒级土壤团聚体全氮含量 (C_i) 及其对土壤全氮的贡献率 (CR_i) 的影响Table 2 Effects of nitrogen fertilization rate and planting pattern on total nitrogen contents in soil aggregates with different sizes (C_i) and their relative contribution rates to total soil nitrogen (CR_i)

施肥处理 Fertilization treatment	采土位置 Location of soil sample	≥ 2 mm		0.25~2 mm		0.053~0.25 mm		<0.053 mm	
		$C_i/(g \cdot kg^{-1})$	$CR_i/\%$	$C_i/(g \cdot kg^{-1})$	$CR_i/\%$	$C_i/(g \cdot kg^{-1})$	$CR_i/\%$	$C_i/(g \cdot kg^{-1})$	$CR_i/\%$
N0	B	1.19±0.01bC	7.0±0.5cBC	1.09±0.03cC	65.9±1.0aA	0.94±0.01bC	9.9±0.18bA	1.18±0.07aB	6.7±0.1bB
	F	1.37±0.02aC	12.4±0.2aA	1.25±0.05abB	60.6±0.4bB	1.07±0.01aB	9.4±0.8bC	1.22±0.03aB	13.0±1.0aA
	M	1.18±0.06bC	9.2±0.5bA	1.13±0.05bcC	61.3±1.0bB	0.92±0.03bB	13.3±0.3aAB	1.02±0.05bD	7.2±1.1bABC
	FM	1.34±0.02aD	12.6±0.3aB	1.28±0.05aB	66.0±1.4aA	1.10±0.02aB	14.5±0.3aB	1.22±0.01aC	7.4±0.2bA
N100	B	1.27±0.04bBC	7.9±0.6bcAB	1.26±0.03bB	64.0±1.3aA	1.08±0.05aB	10.0±0.2bA	1.28±0.04aA	8.0±0.7bAB
	F	1.56±0.06aAB	10.4±1.4bAB	1.41±0.07aA	64.3±1.1aB	1.19±0.06aAB	12.1±1.3abBC	1.30±0.09aAB	12.7±0.9aA
	M	1.41±0.08abB	7.1±0.3cBC	1.30±0.05abB	63.4±2.1aB	1.11±0.01aA	16.0±1.4aA	1.15±0.03aC	8.5±0.8bAB
	FM	1.44±0.04abCD	15.3±1.0aA	1.37±0.01abB	64.1±1.3aAB	1.20±0.02aB	13.8±1.8abB	1.30±0.06aBC	5.1±0.5cBC
N200	B	1.40±0.06bABC	5.3±0.6cC	1.30±0.02bB	64.8±3.9aA	1.12±0.02aB	11.6±0.6aA	1.31±0.04aA	9.3±1.1abAB
	F	1.55±0.05aAB	9.4±0.5aB	1.46±0.06aA	60.7±0.4aB	1.23±0.06aAB	14.6±1.4aB	1.33±0.30aAB	12.6±2.0aA
	M	1.52±0.03abAB	6.0±0.7bcC	1.40±0.02abAB	62.2±1.2aB	1.16±0.04aA	15.6±1.6aA	1.31±0.01aB	9.1±1.2abA
	FM	1.60±0.03aBC	7.0±0.5bC	1.54±0.09aAB	67.0±1.0aA	1.22±0.06aB	16.7±1.9aAB	1.37±0.06aABC	4.8±0.4bBC
N300	B	1.36±0.01bAB	8.7±0.3bAB	1.33±0.40bABC	64.3±2.5aA	1.12±0.03aB	11.4±0.6bA	1.32±0.05aA	9.3±0.5bAB
	F	1.58±0.08aAB	9.6±0.5bB	1.42±0.01abA	64.7±1.3aA	1.21±0.02aAB	12.8±1.1abB	1.35±0.03aAB	11.5±1.2aA
	M	1.52±0.02abAB	8.5±0.4bAB	1.39±0.05abB	61.7±0.7aB	1.13±0.03aA	11.3±1.6bC	1.29±0.04aB	7.6±1.0cAB
	FM	1.57±0.06aBC	12.2±0.4aB	1.53±0.09aAB	67.2±2.1aA	1.22±0.07aB	15.6±2.4aB	1.41±0.08aAB	5.6±0.5dB
N400	B	1.52±0.05bA	7.3±0.6bB	1.35±0.02bB	69.3±2.2aA	1.15±0.02bB	12.0±0.8bA	1.38±0.04bcA	9.3±0.3abAB
	F	1.68±0.01abAB	10.2±0.5abAB	1.53±0.09abA	63.2±1.3bB	1.28±0.08abAB	15.2±1.7bA	1.40±0.02bAB	12.1±0.8aA
	M	1.57±0.03bA	9.6±0.3abA	1.40±0.07bAB	69.0±1.0aA	1.24±0.06abA	12.3±0.8bAB	1.34±0.05cAB	4.2±0.4cC
	FM	1.83±0.11aAB	11.8±0.7aB	1.73±0.07aA	61.5±2.6bB	1.45±0.07aA	20.4±0.3aA	1.50±0.02aA	5.4±0.9bcBC
N600	B	1.57±0.05bAB	9.2±0.5aA	1.49±0.03bA	63.9±1.0bcB	1.27±0.03aA	12.3±1.1bA	1.37±0.06aA	9.8±0.8aA
	F	1.72±0.04aA	10.3±0.5aAB	1.58±0.02bA	61.0±0.3cB	1.32±0.11aA	17.6±1.2aA	1.48±0.12aA	10.6±0.2aA
	M	1.62±0.07abA	9.8±0.5aA	1.54±0.02bA	68.7±1.1aA	1.17±0.05aA	11.1±0.6bB	1.42±0.04aA	5.3±1.0bBC
	FM	1.67±0.30abA	11.0±0.3aB	1.70±0.04aA	66.6±1.7abA	1.41±0.10aAB	13.3±0.5bB	1.48±0.03aA	4.2±0.5bC

N0、N100、N200、N300、N400和N600处理每年的施氮量分别为0、100、200、300、400和600 kg·hm⁻²; B、F、M和FM分别表示非根际土、间作大豆根际土、单作玉米根际土和间作玉米根际土。不同小写字母表示同一施肥处理不同类型采土位置间差异显著($P<0.05$), 不同大写字母表示同类型采土位置不同施肥处理间差异显著($P<0.05$)。N0, N100, N200, N300, N400 and N600 are treatments of annual nitrogen fertilization rates of 0, 100, 200, 300, 400 and 600 kg·hm⁻², respectively. B, F, M and FM represent the non-rhizosphere soil, rhizosphere soil of intercropped soybean, rhizosphere soil of monocropped maize and rhizosphere soil of intercropped maize, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different locations of soil samples under the same fertilization treatment at $P<0.05$ level. Different capital letters indicate significant differences among different fertilization treatments in the same location of soil sample at $P<0.05$ level.

体全氮含量增幅低于玉米单作(B和M)。这从另一侧面反映了间作体系中豆科作物在长期不施肥土壤上可充分发挥固氮潜势, 固持的氮量呈随施氮量降低而增加的趋势, 即无肥区固持氮量高于施肥区, 间作缩小了施肥量增加引起的土壤氮素的增加幅度, 故造成间作施肥区与无肥区团聚体氮素含量差值低于单作。这也说明可以在贫瘠土壤上通过豆科作物与主粮作物间作来提升土壤氮素, 是农业绿色发展可推行的有效路径之一。

在同一施氮量下, 间作与单作的土壤团聚体全氮含量差值可表征玉米种植体系中引入豆科作物后由于豆科作物固氮而引起的土壤氮素的提升。从表2可以看出, F与FM土壤团聚体全氮含量均高于B和M, 表明豆科作物固氮提高了团聚体全氮含量。

在 ≥ 2 mm的粗大团聚体、0.25~2 mm的细大团聚体、0.053~0.25 mm的微团聚体和<0.053 mm的粉黏粒中, 各施肥处理F比B依次增加9.5%~22.8%、6.0%~14.7%、3.9%~13.8%和1.4%~8.0%, 其均值依次为14.2%、10.8%、9.5%和3.0%。各粒级团聚体全氮含量两者的差值均以N0处理最大, 表明间作种植下, 豆科作物固氮显著提高了长期低氮处理的土壤氮素含量; 两者的差值随土壤团聚体粒级由大到小呈减小的趋势, 表明豆科固氮首先补充了两种大团聚体的氮, 其次是微团聚体, 对粉黏粒氮素补充甚微。各施肥处理FM与M的差值表征间作体系中由于作物根系种间互作引起的玉米根际土壤氮素变化, 各施肥处理FM比M的增幅依团聚体粒级由大到小依次为2.1%~16.6%、5.4%~23.6%、5.2%~20.5%和4.6%~

19.6%, 均值依次为 7.3%、12.1%、13.0% 和 10.4%, 表明间作体系中由于种间互作和豆科作物固氮诱导了玉米根际土壤氮素的提升, 其提升效果暂未表现出随施肥量和团聚体粒级变化的明显规律性, 多数粒级中仍以 N0 处理的最高, 偶有粒级中以 N400 最高或居次, 表明适宜施氮可能会提高作物根系的种间互作效应。因本研究实施间作种植年限太短, 施肥量与间作体系种间互作效应的耦合关系尚待进一步研究和验证。

土壤全氮团聚体贡献率是水稳性团聚体组成及其全氮含量的函数, 受施肥量和种植方式影响如表 2 所示。各处理土壤团聚体氮素贡献率主要来自 0.25~2 mm 的细大团聚体, 其贡献率为 60.6%~69.3%; 其次为 0.053~0.25 mm 的微团聚体, 其贡献率为 9.4%~20.4%; 再次为 ≥ 2 mm 的粗大团聚体, 其贡献率为 5.3%~15.3%; <0.053 mm 的粉黏粒对全氮的贡献甚微, 其贡献率仅为 4.2%~13.0%。施肥对土壤全氮团聚体贡献率的影响未表现出明显变化规律; 从种植方式的影响来看, 只在粒级 ≥ 2 mm 的粗大团聚体表现为间作大于单作, 其他粒级未表现出明显的规律性, 这表明豆科作物固氮的影响短期内只影响到了粗大团聚体。

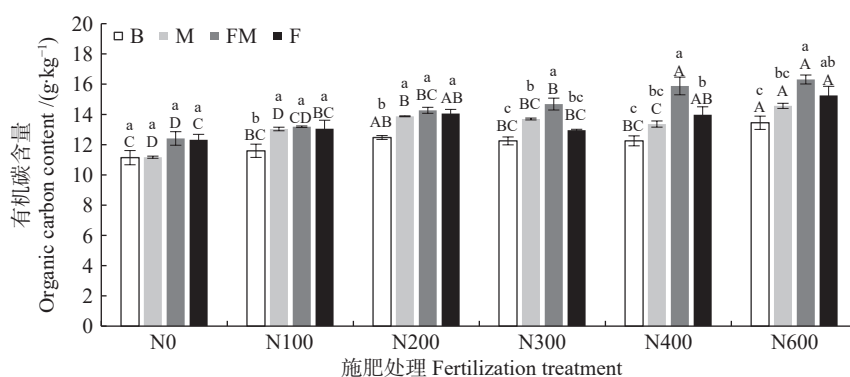
2.5 长期不同施氮量下玉米间作豆科作物对土壤有机碳及团聚体碳库的影响

图 6 为长期不同施氮量与短期种植方式对作物根际与非根际土壤有机碳含量的影响。土壤有机碳随施氮量的变化趋势与全氮相似, 亦表现为随施氮

量增加而增加的趋势, 仅 F 呈先增加后降低再增加趋势。当施氮量超过 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 后, 土壤有机碳的增速变缓 (FM 除外)。土壤有机碳随施氮量增加而增加主要源于秸秆还田量的增加, 与 N0 相比, 从 N100 到 N600 处理 B 土壤有机碳含量依次增加 4.1%、12.0%、10.0%、10.0% 和 20.7%, M 依次增加 16.7%、24.2%、22.6%、19.6% 和 30.4%, FM 依次增加 6.3%、15.0%、18.3%、28.0% 和 31.4%, F 依次增加 5.9%、14.1%、5.1%、13.4% 和 23.8%。由此可见, 作物根际土壤有机碳含量随施肥量增加而提升的幅度高于非根际土壤。

在相同施肥处理下, 作物根际土壤有机碳含量高于非根际土壤, 主要是源于作物根系分泌物和根际沉积碳。与 B 相比, 从 N0 到 N600, M 的有机碳增量依次为 0.3%、12.4%、11.2%、11.8%、9.1% 和 8.3%, FM 的增量依次为 11.4%、13.7%、14.4%、19.9%、29.6% 和 21.3%, F 的增量依次为 10.6%、12.6%、12.7%、5.8%、14.1% 和 13.4%。由此可见, FM 较 B 的有机碳增幅高于 M 的增幅, 表明大豆与玉米间作很可能会诱导玉米根系分泌物和沉积碳增加, 从而造成间作体系中玉米根际土壤有机碳含量高于单作玉米。

各粒级水稳性团聚体有机碳含量见表 3。大多数情况下, 大团聚体中有机碳含量高于微团聚体和粉黏粒, 而粗大团聚体有机碳含量高于细大团聚体。施肥与种植方式对有机碳在土壤团聚体中的分布产生影响, 在同一取样部位, 随施氮量增加 $\geq 0.25 \text{ mm}$



N0、N100、N200、N300、N400 和 N600 处理每年的施氮量分别为 0、100、200、300、400 和 600 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; B、M、FM 和 F 分别表示非根际土、单作玉米根际土、间作玉米根际土和间作大豆根际土。不同小写字母表示同一施肥处理不同类型采土位置间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同类型采土位置不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。N0, N100, N200, N300, N400 and N600 are treatments of annual nitrogen fertilization rates of 0, 100, 200, 300, 400 and 600 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. B, M, FM and F represent the non-rhizosphere soil, rhizosphere soil of monocropped maize, rhizosphere soil of intercropped maize and rhizosphere soil of intercropped soybean, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different locations of soil samples under the same fertilization treatment at $P < 0.05$ level. Different capital letters indicate significant differences among different fertilization treatments in the same location of soil sample at $P < 0.05$ level.

图 6 施氮量与种植方式对土壤有机碳含量的影响

Fig. 6 Effects of nitrogen fertilization rate and planting patterns on the contents of soil organic carbon

表 3 施氮量与种植方式对不同粒级土壤团聚体有机碳含量 (C_i) 及其对土壤有机碳贡献率 (CR_i) 的影响
Table 3 Effects of nitrogen fertilization rate and planting pattern on organic carbon content in soil aggregates with different sizes (C_i) and their relative contribution rates to total soil organic carbon (CR_i)

施肥处理 Fertilization treatment	采土位置 Location of soil sample	≥ 2 mm		0.25~2 mm		0.053~0.25 mm		<0.053 mm	
		$C_i/(g \cdot kg^{-1})$	$CR_i/\%$	$C_i/(g \cdot kg^{-1})$	$CR_i/\%$	$C_i/(g \cdot kg^{-1})$	$CR_i/\%$	$C_i/(g \cdot kg^{-1})$	$CR_i/\%$
N0	B	14.5±0.3aAB	12.0±0.5bA	11.9±0.5aA	72.9±1.7aAB	9.4±0.6aA	9.9±0.6bcA	10.9±0.4aB	7.8±0.6bAB
	F	13.9±0.4aA	17.7±1.5aA	11.6±0.8aB	54.8±1.3cC	9.7±0.6aB	9.1±1.3cB	10.2±0.3aA	11.5±0.9aAB
	M	12.6±0.8aB	14.6±0.2bA	11.4±1.0aB	63.9±2.4bA	9.6±0.2aB	14.6±0.7aABC	9.6±0.5aB	7.6±1.1bBC
	FM	14.0±0.3aB	12.4±0.4bB	11.8±0.5aD	64.8±1.6bBC	10.2±0.1aC	13.1±1.3abB	10.6±0.3aC	4.3±0.5cA
N100	B	12.9±0.3bB	11.5±0.6bAB	12.0±0.3bA	70.1±0.1aBC	9.8±0.4aA	11.5±0.4cA	11.7±0.5aAB	9.0±0.8bAB
	F	15.4±0.5aA	8.5±0.9bcBC	13.6±0.0aA	68.4±0.7aA	10.7±0.7aAB	11.3±0.5cAB	11.9±1.2aA	12.2±0.8aA
	M	15.0±0.2aA	7.7±0.3cE	13.6±0.6aA	67.3±0.9abA	10.9±0.2aAB	15.6±0.4aAB	11.0±0.3aAB	8.4±0.1bBC
	FM	15.2±0.3aAB	17.2±0.5aA	13.6±0.4aC	65.5±1.3bBC	10.9±0.4aBC	13.3±0.2bB	12.4±0.4aAB	5.1±0.6cA
N200	B	13.4±0.5bAB	5.2±0.4bE	12.4±0.9bA	62.0±3.0bD	10.2±0.0bA	11.5±1.2cA	12.7±0.5aA	9.2±1.1bAB
	F	15.8±1.7aA	7.6±0.3aC	14.0±0.1abA	70.6±2.1abA	10.1±0.3bB	12.9±1.4bcA	11.0±0.3bA	11.1±0.4aAB
	M	16.7±0.4aA	8.6±0.7aDE	14.5±0.8abA	67.7±5.6abA	12.1±0.5aA	16.8±1.5abA	12.9±0.3aA	9.5±0.7abAB
	FM	17.4±1.0aA	8.6±0.7aC	16.0±0.4aAB	77.0±2.6aA	12.5±0.4aA	19.8±1.6aA	13.7±0.7aA	5.3±0.6bA
N300	B	14.9±0.1aA	7.9±0.1cCD	12.5±0.5bA	66.0±1.9bBCD	9.8±0.3bA	12.2±0.7bA	11.9±0.3abAB	8.5±0.5bcAB
	F	15.0±0.4aA	9.9±0.3bBC	13.6±0.5abA	71.2±0.5aA	10.8±0.3bAB	12.7±0.7bA	11.6±0.2bA	9.0±1.1bB
	M	15.4±0.5aA	10.6±0.3bBC	14.6±0.8aA	67.2±1.4bA	10.9±0.4abAB	11.4±0.9bC	12.3±0.7abA	12.0±0.8aA
	FM	16.0±0.2aAB	11.8±0.2aB	14.9±0.2aBC	60.5±0.1cC	12.0±0.4aAB	19.4±0.8aA	13.8±0.9aA	5.9±0.9cA
N400	B	15.5±0.4aA	7.0±0.6bDE	13.6±0.6bA	80.0±4.3aA	10.3±0.1bA	11.0±0.4cA	12.0±0.4aAB	7.2±0.6aB
	F	15.9±0.4aA	11.0±0.6aB	14.0±0.5bA	62.6±0.9bcB	11.0±1.1bAB	14.6±1.1bA	11.5±1.1aA	5.3±0.1aC
	M	16.3±0.6aA	12.2±0.9aB	12.8±0.4bAB	70.7±2.4bA	11.0±0.6bAB	12.2±1.2bcBC	12.0±0.1aA	5.3±0.4aC
	FM	16.8±0.3aA	12.9±0.7aB	16.5±0.1aA	60.5±0.1cC	12.7±0.4aA	19.4±0.5aA	12.9±0.4aAB	5.9±0.9aA
N600	B	14.2±0.1cAB	9.7±0.4bBC	13.2±0.3bA	64.1±0.8aCD	10.2±0.3bA	10.1±0.1cA	11.9±0.4aAB	10.0±0.4aA
	F	14.7±0.7bcA	9.6±0.6bBC	13.4±0.2bA	59.0±1.2bB	12.0±0.2aA	14.5±0.7aA	12.3±1.3aA	8.2±1.1aBC
	M	16.0±0.5abA	9.7±0.6bCD	14.1±0.3abA	67.3±0.7aA	11.6±0.5abA	12.0±1.1bcC	12.6±1.0aA	5.1±1.1bC
	FM	16.7±0.3aA	12.4±0.7aB	15.5±0.8aAB	67.6±2.5aB	12.2±0.8aAB	13.8±0.9abB	11.9±0.4aBC	3.9±0.4bA

N0、N100、N200、N300、N400和N600处理每年的施氮量分别为0、100、200、300、400和600 kg·hm⁻²; B、F、M和FM分别表示非根际土、间作大豆根际土、单作玉米根际土和间作玉米根际土。不同小写字母表示同一施肥处理不同类型采土位置间差异显著($P<0.05$), 不同大写字母表示同类型采土位置不同施肥处理间差异显著($P<0.05$)。N0, N100, N200, N300, N400 and N600 are nitrogen fertilization annual rates of 0, 100, 200, 300, 400 and 600 kg·hm⁻², respectively. B, F, M and FM represent the non-rhizosphere soil, rhizosphere soil of intercropped soybean, rhizosphere soil of monocropped maize and rhizosphere soil of intercropped maize, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different locations of soil samples under the same fertilization treatment at $P<0.05$ level. Different capital letters indicate significant differences among different fertilization treatments in the same location of soil sample at $P<0.05$ level.

的大团聚体的有机碳含量基本呈起伏性增加趋势; 在同一施氮量下 (N0 除外), 根际土 ≥ 0.25 mm 的大团聚体有机碳含量高于非根际土。微团聚体和粉黏粒的有机碳含量虽受施肥与种植方式的影响, 但随施肥量和取土部位的不同未表现出明显的变化规律。这说明不同施氮量和种植方式下作物根系对土壤大团聚体中有机碳含量的影响强于微团聚体和粉黏粒, 玉米与豆科作物间作有利于提升土壤大团聚体有机碳含量。

施氮量和种植方式对土壤团聚体有机碳贡献率的影响如表 3 所示。结果表明, 各处理土壤团聚体有机碳贡献率基本表现为细大团聚体>粗大团聚体>微团聚体>粉黏粒, 即土壤有机碳主要分布在 0.25~2 mm 的细大团聚体中, 其对土壤总有机碳的贡献率

为 54.8%~80.0%; 其次为 ≥ 2 mm 的粗大团聚体, 贡献率为 5.2%~17.7%; 再次为 0.053~0.25 mm 的微团聚体, 贡献率为 9.1%~19.8%; <0.053 mm 的粉黏粒对土壤有机碳的贡献较微弱, 仅为 3.9%~12.2%。由此可见, 本区域长期实施的秸秆还田和作物根系分泌物沉积在根际的有机碳更易在大团聚体中贮存。

综上所述, 由于土壤有机碳和全氮的团聚体贡献率受水稳性团聚体构成、有机碳和全氮含量的双重影响, 本研究中长期的不同施氮量和短期的种植方式改变对不同粒级团聚体有机碳和全氮贡献率的影响效果还未表现明显的规律性, 后期尚需开展种植方式改变后对土壤碳氮周转与贮存影响的持续研究, 进一步探究其影响机制, 阐明其变化规律。

3 讨论

3.1 玉米间作豆科作物促进了土壤大团聚体形成和水稳定性提升

土壤结构、性能与土地利用方式、管理措施密切相关。种植、施肥、耕作、秸秆还田等农业管理措施通过改变土壤属性、内部环境以及生物活性影响着土壤颗粒团聚化过程以及团聚体的稳定性^[5]。 $\geq 0.25\text{ mm}$ 的团聚体通常被称为土壤团粒结构体,是土壤中最好的结构体,其质量百分比($R_{0.25}$)可以衡量土壤结构的优劣,此值越高,团聚体稳定性越高,土壤结构越好^[34],越有利于土壤对水分、有机碳和养分的转化,从而提高土壤生产力并促进作物生长,实现高产稳产。土壤团聚体结构稳定性可以用土壤团聚体平均重量直径、结构破碎率和稳定率表征,土壤团聚体平均重量直径和稳定率越高、结构破碎率越低,团聚体稳定性越强^[35]。本研究结果表明,施氮量对团聚体组成及其稳定性的影响弱于不同种植方式下作物根系的影响,且只在玉米与大豆间作体系中施氮量对玉米根际(FM)土壤粗大团聚体稳定性有显著影响,施氮量不足或过高都不利于提升团聚体的稳定率,以N400处理FM的团聚体结构破碎率最低、稳定率最高。前人研究发现施氮降低了土壤团聚体稳定性^[36-38]。本研究结果未能像前人的研究一样表现出明显的规律性,这可能与该区域长期实施秸秆还田,秸秆腐解对团聚体的影响效果弱化或掩盖了无机氮肥施用对团聚体的影响。

在各施氮量下,与非根际土相比,作物根系生长降低了根际土壤机械稳定性粗大团聚体含量、增加了细大团聚体含量;对于水稳定性团聚体,单作作物根系生长的影响不显著,间作提高了玉米根际土(FM)粗大团聚体的稳定率。由此可见,推行玉米与豆科作物间作具有提升土壤团聚体稳定性的潜势,特别是有利于粗大团聚体形成及其稳定性提升。大量研究表明,禾本科作物与豆科作物间作有利于提高土壤大团聚体含量及其稳定性。乔鑫鑫等^[39]在华北平原研究了在冬小麦-夏玉米轮作体系中夏季引入花生与玉米进行复种对土壤团聚体的影响,发现玉米与花生复种明显增加了土壤大团聚体含量,增强了团聚体的机械稳定性和水稳定性。白录顺等^[40]和赵吉霞等^[19]在南方红壤区开展的间作试验结果均表明,玉米与大豆间作可以显著提高水稳性大团聚体含量,特别是对 $\geq 2\text{ mm}$ 的团聚体提高效果最明显。Li等^[17]在甘肃和宁夏开展的间作模式长期定位试验结果亦表明,不同作物间作可以增加土壤大团聚体

含量,提高团聚体稳定性。这些与本研究的结果一致。究其原因:一方面玉米与豆科作物间作由于种间互作和根土互作,增加了根系分泌物的种类和数量,根系分泌物不仅可作为土粒胶结剂,促进土壤团粒结构的形成,还可作为土壤微生物的重要碳源物质,促进微生物活动并释放多糖等物质,且提升根际真菌菌丝活力,进一步增强了微团聚体的胶结作用,从而促进微团聚体转化为大团聚体,增强了土壤团聚体的稳定性^[19,41-43];另一方面,不同类型作物间作有利于维持土壤生物多样性,土壤碳氮转化作用增强,产生大量蛋白质、多糖、木质素等物质,从而间接促进了大团聚体的形成^[41,44-45]。

3.2 适宜施氮量耦合玉米间作豆科作物可提高土壤团聚体有机碳和全氮含量及其贡献率

土壤团聚体中有机碳和氮不仅促进了团聚体的形成,也能够显著促进其自身稳定性,而且稳定的团聚体具有更强的对有机碳和氮的物理保护作用,促进土壤碳氮的有效固持与保蓄,从而实现肥沃土壤培育,促进作物生长,提升土壤生产能力。作物种植及其农事管理措施能够显著影响土壤结构和养分周转,也是土壤团聚体分布及更新周转的主要驱动因素,在一定条件下,对农田土壤养分的涵养发挥着重要作用。前人研究表明,玉米与豆科作物间套作、轮作等多样化种植可显著提高土壤有机碳和全氮储量,主要得益于水稳性大团聚体有机碳和全氮对土壤总有机碳氮的贡献^[13,38-39,42,46]。本研究亦得到类似结果,玉米与大豆间作可有效提升土壤有机碳和全氮含量。分析原因:一方面,豆科作物具有较强的固氮功能,不仅可将大气中的氮固定在土壤中以增加土壤氮含量,还可促进作物生长并固碳,从而增加土壤有机碳含量^[13],即通过在玉米种植体系中引入豆科作物实现固氮增碳;另一方面,不同类型作物间作增加了作物多样性,种间互作和根土互作导致土壤微生物活性和多样性增加,进而对土壤碳氮循环等产生正向影响^[47],促进了土壤碳氮的积累。本研究还发现,玉米与大豆间作会对有机碳和全氮在团聚体中的分布产生影响,主要提高了大团聚体有机碳和全氮含量,特别是对粗大团聚体有机碳和全氮的影响最为显著;各处理有机碳和全氮在大团聚体中的含量高于微团聚体和粉黏粒,其中,细大团聚体是土壤有机碳和全氮的主要贡献者。这些结果与在东北^[13]、南方红壤区^[19]、黄土高原区^[46]等多地开展的间作对土壤团聚体碳氮分布影响的研究结果基本一致,并符合Six等^[8,28]提出的“大团聚体周转”概念模型,即

新输入有机物在胶结物质作用下首先形成大团聚体,土壤有机碳、氮等养分首先在大团聚体中聚集,然后随着颗粒有机物的分解,微团聚体逐渐形成,进而增加微团聚体碳氮含量。

玉米与豆科作物间作增加了输入土壤的有机碳和全氮数量,促进土壤生物与理化性状发生改变,进而影响土壤碳氮周转,这种间作效应亦受到土壤氮素的调控^[38-42]。本研究结果表明,施氮可有效提升土壤有机碳和全氮含量,但随施肥量的增加间作和单作的土壤氮素提升幅度存在差异,间作更有利于提升低氮土壤的碳氮含量。这与阮文亮等^[38]的减量施氮和甜玉米||大豆间作有利于提升土壤团聚体稳定性和有机碳和全氮固持潜力的结果相似。这与豆科作物固氮作用缓解低氮土壤氮素限制有关,为实施化肥减施提供了理论支撑。在本研究中,间作提升土壤团聚体有机碳和全氮的间作效应受施氮量的调控尚未表现出明显的规律性,依据 Six 等^[8,28]提出的“大团聚体周转”概念模型,大团聚体向微团聚体转化需要较长时间,因此,施肥与种植方式对土壤团聚体碳氮含量的影响还需要较长的时间来验证。

4 结论

施肥和种植方式是影响土壤团聚体组成与碳氮分布特征的重要农业管理措施。在玉米种植体系中引入豆科作物进行间作有利于发挥种间根系互作和根土互作效应,提升土壤大团聚体含量及土壤结构的稳定性。施氮量对团聚体组成及其稳定性的影响弱于不同种植方式下作物根系的影响,施氮量只在间作体系中引起玉米根际土粗大团聚体破碎率和稳定率产生显著性差异,其他根际土和非根际土的不同施肥处理间均无显著差异。在相同施肥情况下,根际土较非根际土降低了粗大团聚体破碎率并提高了其稳定率,提高了水稳性粗大团聚体含量。施氮量对间作体系中种间根系互作、根土互作效应有一定的调控作用,施氮量不足和施肥量过高都不利于提升团聚体的稳定率,以 N400 处理间作玉米根际土的团聚体结构破碎率最低、稳定率最高,表明适宜施氮有利于提高间作体系土壤团聚体稳定性。

施氮可有效提升土壤有机碳和全氮含量,但随施氮量的增加间作和单作两种种植体系土壤氮素提升幅度存在差异,间作更有利于提升低氮处理土壤碳氮含量,主要得益于豆科作物在低氮情况下更有利于发挥固氮作用,从而提高固氮量以补充土壤氮素,缓解了低氮处理长期施肥不足造成的氮素限制,

为推行豆科||禾本科间作体系中化肥减施提供了基础依据。有机碳和全氮在大团聚体中的含量高于微团聚体和粉黏粒,间作提高了大团聚体有机碳和全氮含量,特别是对粗大团聚体有机碳和全氮影响最为显著,说明种植方式的改变首先影响的是碳氮在大团聚体中的分布。

综上所述,玉米与豆科作物间作提高了土壤大团聚体含量,增加了土壤团聚体稳定性及有机碳和全氮含量,有利于促进土壤碳氮固持。间作体系的种间互作和豆科作物固氮诱导了玉米根际土壤碳氮的提升,但其提升效果只在粗大团聚体有明确体现,其他粒级团聚体中暂未表现出随施氮量和团聚体粒级变化的明显规律性,多数粒级中仍以 N0 处理的提升效果最高,偶有粒级中以 N400 最高或居次,表明适宜施氮有可能会提高作物根系的种间互作效应。因本研究实施间作种植年限太短,施氮量与间作体系种间互作效应的耦合关系尚待进一步研究和验证。

参考文献 References

- [1] GUNINA A, KUZUYAKOV Y. Pathways of litter C by formation of aggregates and SOM density fractions: Implications from ¹³C natural abundance[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 71: 95-104
- [2] XIE J, PENG B, WANG R, et al. Responses of crop productivity and physical protection of organic carbon by macroaggregates to long-term fertilization of an Anthrosol[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3): 555-567
- [3] LAL R. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century[J]. *Soil Science*, 2000, 165(3): 191-207
- [4] 赵京考, 刘作新, 韩永俊. 土壤团聚体的形成与分散及其在农业生产上的应用[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(6): 163-166
- [5] ZHAO J K, LIU Z X, HAN Y J. Review on formation and dispersion of aggregates and their application in agriculture[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(6): 163-166
- [6] 程乙, 任昊, 刘鹏, 等. 不同栽培管理模式对农田土壤团聚体组成及其碳、氮分布的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3521-3528
- [7] CHENG Y, REN H, LIU P, et al. Effects of different cultivation practices on composition, carbon and nitrogen distribution of soil aggregates in farmlands[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(11): 3521-3528
- [8] 贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 应用 DNDC 模型分析东北黑土有机碳演变规律及其与作物产量之间的协同关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 9-19
- [9] HE M, WANG Y C, WANG L G, et al. Using DNDC model to simulate black soil organic carbon dynamics as well as its coordinate relationship with crop yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 9-19
- [10] 张家春, 刘盈盈, 贺红早, 等. 土壤团聚体与有机碳固定关系研究进展[J]. *福建农业学报*, 2016, 31(3): 319-325
- [11] ZHANG J C, LIU Y Y, HE H Z, et al. Research advances on

- mechanism of organic carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31(3): 319–325
- [8] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099–2103
- [9] NYAWADE S O, KARANJA N N, GACHENE C K K, et al. Short-term dynamics of soil organic matter fractions and microbial activity in smallholder potato-legume intercropping systems[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 142: 123–135
- [10] BIMÜLLER C, KREYLING O, KÖBL A, et al. Carbon and nitrogen mineralization in hierarchically structured aggregates of different size[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 23–33
- [11] 张维理, KOLBE H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(2): 317–331
- ZHANG W L, KOLBE H, ZHANG R L. Research progress of SOC functions and transformation mechanisms[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2): 317–331
- [12] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 415–421
- WANG Q K, WANG S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 415–421
- [13] 孙涛, 冯晓敏, 高新昊, 等. 多样化种植对土壤团聚体组成及其有机碳和全氮含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(15): 2929–2940
- SUN T, FENG X M, GAO X H, et al. Effects of diversified cropping on the soil aggregate composition and organic carbon and total nitrogen content[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(15): 2929–2940
- [14] 武均, 蔡立群, 齐鹏, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3): 276–284
- WU J, CAI L Q, QI P, et al. Distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in dry farmland soil aggregates under different tillage methods in the Loess Plateau of central Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(3): 276–284
- [15] TILMAN D, BALZER C, HILL J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): 20260–20264
- [16] CONG W F, HOFFLANDE E, LI L, et al. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1715–1726
- [17] LI X F, WANG Z G, BAO X G, et al. Long-term increased grain yield and soil fertility from intercropping[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(11): 943–950
- [18] 王亚君, 王腾琦, 侯志洁, 等. 根系分泌物对紫云英油菜间作的响应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1783–1790
- WANG Y J, WANG T Q, HOU Z J, et al. Responses of root exudates to intercropping of Chinese milk vetch with rape[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5): 1783–1790
- [19] 赵吉霞, 酒鹃鹃, 李永梅, 等. 玉米-大豆间作对坡耕地红壤团聚体微生物生物量碳氮的影响[J]. *中国水土保持科学* (中英文), 2025, 23(1): 150–158
- ZHAO J X, JIU J J, LI Y M, et al. Effects of maize-soybean intercropping on aggregate microbial biomass carbon and nitrogen in a red soil on a sloping field[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(1): 150–158
- [20] 隋鑫, 霍海南, 鲍雪莲, 等. 覆盖作物的种植现状及其对下茬作物生长和土壤环境影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2666–2674
- SUI X, HUO H N, BAO X L, et al. Research advances on cover crop plantation and its effects on subsequent crop and soil environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2666–2674
- [21] GHIMIRE R, GHIMIRE B, MESBAH A O, et al. Soil health response of cover crops in winter wheat-fallow system[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(4): 2108–2115
- [22] 魏静. 不同冬季覆盖作物对土壤养分及雨养玉米生长特征的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018
- WEI J. Effects of different winter cover crops on soil nutrients and growth characteristics of rainfed maize[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018
- [23] 熊静, 王改兰, 曹卫东, 等. 华北二月兰-春玉米轮作体系中土壤硝态氮的时空变化特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 467–473
- XIONG J, WANG G L, CAO W D, et al. Temporal and spatial variations of soil NO_3^- -N in *Orychophragmus violaceus*/spring maize rotation system in North China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 467–473
- [24] HAUGGAARD-NIELSEN H, GOODING M, AMBUS P, et al. Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N_2 -fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 64–71
- [25] LI C J, LI Y Y, YU C B, et al. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in Northwest China[J]. *Plant and Soil*, 2011, 342(1): 221–231
- [26] 肖靖秀, 汤利, 郑毅, 等. 大麦/蚕豆间作条件下供氮水平对作物产量和大麦氮吸收累积的影响[J]. *麦类作物学报*, 2011, 31(3): 499–503
- XIAO J X, TANG L, ZHENG Y, et al. Effects of N level on yield of crops, N absorption and accumulation of barley in barley and faba bean intercropping system[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(3): 499–503
- [27] 王恭祿, 段碧华, 石书兵. 作物间作[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013
- WANG G Y, DUAN B H, SHI S B. Crop Intercropping[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2013
- [28] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367–1377
- [29] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(4): 1071–1076
- [30] PRASAD J V N S, RAO C S, SRINIVAS K, et al. Effect of ten

- years of reduced tillage and recycling of organic matter on crop yields, soil organic carbon and its fractions in Alfisols of semi arid tropics of southern India[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 131–139
- [31] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(4): 1035–1041
- LIU E K, ZHAO B Q, MEI X R, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4): 1035–1041
- [32] 王富华, 黄容, 高明, 等. 生物质炭与秸秆配施对紫色土团聚体中有机碳含量的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 929–939
- WANG F H, HUANG R, GAO M, et al. Effect of combined application of biochar and straw on organic carbon content in purple soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 929–939
- [33] 张玉铭, 胡春胜, 陈素英, 等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(9): 1558–1570
- ZHANG Y M, HU C S, CHEN S Y, et al. Effects of tillage and straw returning method on the distribution of carbon and nitrogen in soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1558–1570
- [34] EYNARD A, SCHUMACHER T E, LINDSTROM M J, et al. Aggregate sizes and stability in cultivated south Dakota prairie ustolls and usterts[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(4): 1360–1365
- [35] LIU Z X, CHEN X M, JING Y, et al. Effects of biochar amendment on rapeseed and sweet potato yields and water stable aggregate in upland red soil[J]. *Catena*, 2014, 123: 45–51
- [36] 周从从, 陈竹君, 赵世翔, 等. 不同栽培模式及施氮量对土壤团聚体的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(3): 100–105
- ZHOU C C, CHEN Z J, ZHAO S X, et al. Effects of different cultivating patterns and nitrogen fertilizer application on soil aggregates[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(3): 100–105
- [37] 张欣, 任海燕, 韩国栋. 增温和施氮对内蒙古荒漠草原土壤团聚体稳定性及碳含量的影响[J]. *草原与草业*, 2020, 32(2): 22–26
- ZHANG X, REN H Y, HAN G D. Effects of warming and nitrogen application on soil aggregate stability and carbon content in the desert grassland of Inner Mongolia[J]. *Grassland and Prataculture*, 2020, 32(2): 22–26
- [38] 阮文亮, 彭松, 祝晓慧, 等. 减量施氮与间作大豆对甜玉米土壤团聚体及有机碳含量的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2023, 41(5): 811–819
- RUAN W L, PENG S, ZHU X H, et al. Effects of nitrogen reduction and soybean intercropping on soil aggregates and organic carbon content of sweet maize[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2023, 41(5): 811–819
- [39] 乔鑫鑫, 王艳芳, 李乾云, 等. 复种模式对豫西褐土团聚体稳定性及其碳、氮分布的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2021, 27(3): 380–391
- QIAO X X, WANG Y F, LI Q Y, et al. Effects of multi-cropping systems on cinnamon soil aggregate stability, carbon and nitrogen distribution in western Henan Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3): 380–391
- [40] 白录顺, 范茂攀, 王自林, 等. 间作模式下玉米/大豆的根系特征及其与团聚体稳定性的关系[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 124–129
- BAI L S, FAN M P, WANG Z L, et al. Relationship between root characteristics and aggregate stability in the field with maize and soybean intercropping[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 124–129
- [41] 王婷, 李永梅, 王自林, 等. 间作对玉米根系分泌物及团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 185–190
- WANG T, LI Y M, WANG Z L, et al. Effects of intercropping on maize root exudates and soil aggregate stability[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 185–190
- [42] 向蕊, 伊文博, 赵薇, 等. 间作对土壤团聚体有机碳储量的影响及其氮调控效应[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 303–308
- XIANG R, YI W B, ZHAO W, et al. Effects of intercropping on soil aggregate-associated organic carbon storage and nitrogen regulation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 303–308
- [43] SUN Z C, ZHANG Z C, ZHU K, et al. Biochar altered native soil organic carbon by changing soil aggregate size distribution and native SOC in aggregates based on an 8-year field experiment[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 708: 134829
- [44] FREIXO A A, DE A MACHADO P L O, DOS SANTOS H P, et al. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64(3/4): 221–230
- [45] WEI X R, SHAO M G, GALE W J, et al. Dynamics of aggregate-associated organic carbon following conversion of forest to cropland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 876–883
- WEI Y C, MA T E, WEI X R, et al. Effects of cropping systems on distribution of water-stable aggregates and organic carbon and nitrogen in soils in semiarid farmland of the Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 305–313
- [46] 魏艳春, 马天娥, 魏孝荣, 等. 黄土高原旱地不同种植系统对土壤水稳性团聚体及碳氮分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(2): 305–313
- WEI Y C, MA T E, WEI X R, et al. Effects of cropping systems on distribution of water-stable aggregates and organic carbon and nitrogen in soils in semiarid farmland of the Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 305–313
- [47] JIA Y F, ZHAI G Q, ZHU S S, et al. Plant and microbial pathways driving plant diversity effects on soil carbon accumulation in subtropical forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 161: 108375