

DOI: 10.11686/cyxb2024399

http://cyxb.magtech.com.cn

秦文利, 张静, 肖广敏, 等. 绿肥部分替代化肥氮对土壤物理性状的影响. 草业学报, 2025, 34(6): 27-45.

QIN Wen-li, ZHANG Jing, XIAO Guang-min, et al. Effects of partial replacement of chemical nitrogen fertilizers with green manure on soil physical properties and maize (*Zea mays*) yield. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(6): 27-45.

绿肥部分替代化肥氮对土壤物理性状的影响

秦文利¹, 张静¹, 肖广敏¹, 崔素倩², 叶建勋³, 智健飞¹, 张立锋¹, 谢楠¹, 冯伟¹, 刘振宇¹, 潘璇¹, 代云霞¹, 刘忠宽^{1*}

(1. 河北省农林科学院农业资源环境研究所, 河北省肥料技术创新中心, 河北 石家庄 050051; 2. 河北省沧州市渤海新区黄骅市农业农村局, 河北 黄骅 061100; 3. 河北省深州市农业农村局土肥站, 河北 深州 053800)

摘要: 2020—2022年度以毛叶苕子和玉米为材料, 采用二因素裂区田间试验设计, 主处理为冬闲田(FF)、冬闲田种植毛叶苕子并全量还田(HV)2种模式, 副处理为玉米0(0N)、135.0(50%N)和270.0 kg·hm⁻²(100%N)3个施氮水平, 研究了毛叶苕子还田和施氮水平对玉米0~10 cm、10~20 cm土层土壤团聚体组成与分布、团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、破坏率(PAD)、可蚀性因子(K)、容重(BD)、总孔隙度(TP)、毛管孔隙度(CP)、非毛管孔隙度(NCP)、最大持水量(MWHC)、毛管持水量(CWHC)、非毛管持水量(NCWHC)、土壤有机碳(SOC)含量、团聚体有机碳(AOC)含量及玉米产量的影响, 以期从土壤物理性状变化为绿肥部分替代化肥氮实现作物稳产增产提供科学依据。结果表明, 与FF模式相比, HV模式0~10 cm、10~20 cm土层>0.25 mm水稳定性团聚体总含量(R_{0.25})、MWD、GMD、TP、CP、NCP、MWHC、CWHC、NCWHC、SOC含量分别显著增加8.95%、40.84%、30.57%、5.89%、1.47%、4.42%、15.01%、6.41%、27.08%、7.29%和13.13%、62.87%、51.68%、5.02%、0.76%、4.25%、13.11%、3.32%、27.86%、7.10%; PAD、K和BD分别显著降低8.83%、20.79%、5.99%和12.14%、30.73%、7.31%。HV模式下各土层各粒径AOC含量及玉米产量均显著提高。施氮水平对各土层各粒径AOC含量、R_{0.25}及其他物理性状指标、玉米产量影响显著或极显著。HV模式50%N处理0~10 cm、10~20 cm土层的SOC含量、>5 mm AOC含量及0~10 cm土层的0.50~1.00 mm AOC含量、10~20 cm土层的BD、TP、CP、NCP、MWD、CWHC、NCWHC及玉米产量较FF模式100%N处理变化均不显著, 0~10 cm、10~20 cm土层的2.00~5.00 mm、1.00~2.00 mm、0.25~0.50 mm、<0.25 mm AOC含量及10~20 cm土层0.50~1.00 mm的AOC含量, 0~10 cm、10~20 cm土层的R_{0.25}、MWD、GMD, 0~10 cm土层的TP、NCP、MWHC、NCWHC均显著提高, 0~10 cm、10~20 cm土层的PAD、K及0~10 cm土层的BD均显著下降。各粒径AOC含量与SOC含量之间、各粒径团聚体含量与其AOC含量之间、土壤物理性状指标与各粒径团聚体含量之间、玉米产量与土壤物理性状指标之间均呈显著或极显著相关。因此, 绿肥还田后土壤有机碳含量的提高是促进团粒结构形成, 增强土壤抗侵蚀、持水能力的重要基础。绿肥对土壤氮、有机碳的输入是其部分替代氮肥、改善土壤物理性状、实现减氮增产的重要前提。

关键词: 毛叶苕子; 施氮水平; 土壤有机碳含量; 土壤物理性状; 玉米产量

Effects of partial replacement of chemical nitrogen fertilizers with green manure on soil physical properties and maize (*Zea mays*) yield

收稿日期: 2024-10-13; 改回日期: 2024-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD190090107), 河北省省级科技计划(21327503D)和河北省农林科学院科技创新专项(2022KJCXZX-ZHS-7, 2022KJCXZX-ZHS-8)资助。

作者简介: 秦文利(1974—), 女, 河北邯郸人, 副研究员, 博士。E-mail: 941737486@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zhongkuanjh@163.com

QIN Wen-li¹, ZHANG Jing¹, XIAO Guang-min¹, CUI Su-qian², YE Jian-xun³, ZHI Jian-fei¹, ZHANG Li-feng¹, XIE Nan¹, FENG Wei¹, LIU Zhen-yu¹, PAN Xuan¹, DAI Yun-xia¹, LIU Zhong-kuan^{1*}

1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hebei Fertilizer Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050051, China; 2. Agriculture and Rural Development Bureau of Huanghua City, Huanghua 061100, China; 3. Soil and Fertilizer Station of Agriculture and Rural Bureau of Shenzhou City, Shenzhou 053800, China

Abstract: The partial replacement of chemical nitrogen fertilizers with green manure can improve crop yields and soil physical properties. A two-factor split-plot field experiment with maize and hairy vetch was conducted from 2020 to 2022. The main treatment was the cultivation mode before maize planting [winter fallow field (FF) and total return of hairy vetch planted in the winter fallow field (HV)] and the sub-treatment was the nitrogen application level [0 kg·ha⁻¹ (0%N), 135.0 kg·ha⁻¹ (50%N), 270.0 kg·ha⁻¹ (100%N)] to maize as the following crop. The soil physical properties were determined by measuring soil aggregate composition and distribution, mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of aggregates, percentage of aggregate destruction (PAD), soil erodibility factor (K), soil bulk density (BD), total porosity (TP), capillary porosity (CP), non-capillary porosity (NCP), maximum water holding capacity (MWHC), capillary water holding capacity (CWHC), non-capillary water holding capacity (NCWHC), soil organic carbon (SOC) content, and aggregate-associated organic carbon (AOC) content in the 0–10 cm and 10–20 cm soil horizons. Maize yield was also determined. The results showed that, compared with FF, HV significantly increased the proportion of macroaggregates ($R_{0.25}$) in the 0–10 cm and 10–20 cm soil horizons by 8.95% and 13.13%, MWD by 40.84% and 62.87%, GMD by 30.57% and 51.68%, TP by 5.89% and 5.02%, CP by 1.47% and 0.76%, NCP by 4.42% and 4.25%, MWHC by 15.01% and 13.11%, CWHC by 6.41% and 3.32%, NCWHC by 27.08% and 27.86%, and SOC content by 7.29% and 7.10%, respectively; and significantly reduced PAD by 8.83% and 12.14%, K by 20.79% and 30.73%, and BD by 5.99% and 7.31%, respectively. The AOC content of each particle size fraction in each soil layer and maize yield were significantly higher in HV than in FF. The nitrogen application level had significant or extremely significant impacts on the AOC content of each particle size fraction in each soil layer, $R_{0.25}$, and other soil physical indexes and maize yield. The following indexes were not significantly different between the FF100%N and HV50%N treatments: SOC content, AOC contents of the >5 mm fraction of the 0–10 cm and 10–20 cm soil horizons, AOC content of the 0.50–1.00 mm fraction of the 0–10 cm soil horizon, the BD, TP, CP, NCP, MWD, CWHC, NCWHC of the 10–20 cm soil horizon, and maize yield. However, the following indexes were higher in the HV50%N treatment than in the FF100%N treatment: AOC contents of the 2.00–5.00 mm, 1.00–2.00 mm, 0.25–0.50 mm, and <0.25 mm fractions of the 0–10 cm and 10–20 cm soil horizon, AOC content of the 0.50–1.00 mm fraction of the 10–20 cm soil horizon, the $R_{0.25}$, MWD, and GMD of the 0–10 cm and 10–20 cm soil horizons, and the TP, NCP, MWHC, and NCWHC of the 0–10 cm horizon. The PAD and K of the 0–10 cm and 10–20 cm soil horizons and the BD of the 0–10 cm soil horizon were significantly lower in HV50%N than in FF100%N. There were significant or extremely significant correlations between the AOC content of each particle size fraction and SOC content; the content of each particle size fraction and the AOC content; soil physical property indexes and the content of each particle size fraction; and maize yield and soil physical property indexes. The increased SOC content after returning green manure laid the foundation for improved aggregate structure, enhancing soil erosion resistance and WHC. The addition of nitrogen and organic carbon derived from green manure improved the soil's physical properties. The use of green manure achieved the aims of reducing chemical nitrogen inputs and increasing yield.

Key words: hairy vetch; nitrogen application level; soil organic carbon content; soil physical properties; yield of maize

团聚体是形成土壤结构的基本单元,其数量、大小、分布及稳定性影响着土壤容重、孔隙度、持水性、抗蚀性等物理性状,进而影响着土壤协调水肥气热的功能,决定着土壤养分的供给能力,是维持土壤肥力、实现作物稳产增产的重要基础^[1-2]。有机碳是促使土粒胶结成团聚体的主要物质^[3]。绿肥养分全面,富含碳元素,还田后经矿质化过程可快速释放养分替代部分化肥投入,经腐殖化过程可产生多种类型的有机胶结物质,如瞬时有机胶结剂(微生物、纤维素、半纤维素等)、临时性有机胶结剂(植物根、菌丝)及持久性有机胶结剂(难降解的含芳香碳的腐殖质)。瞬时有机胶结剂、临时性有机胶结剂能促进 >0.25 mm粒径的大团聚体的形成并提高其稳定性,持久性有机胶结剂与黏粒、多价阳离子可构成有机-无机复合体,形成 ≤ 0.25 mm粒径的微团聚体^[4-5]。因此,绿肥还田可补充土壤有机碳^[6],促进多种类型土壤团聚体有机胶结剂的产生,有利于土壤团粒结构的形成。吕汉强等^[7]通过分析利用扫描电镜获得的0~30 cm土壤超微观图像发现,豆科绿肥箭筈豌豆(*Vicia sativa*)连续还田能促进土壤小粒径单粒构成团聚体。李文军等^[8]、甘雅芬等^[9]和刘小粉等^[10]研究表明,在团聚体层次性的形成过程中,绿肥能使土壤微团聚体向大团聚体转移,促使其转移的主要原因在于绿肥提高了土壤有机碳含量^[11],而耕层土壤中约90%的有机碳分布于团聚体中^[12]。 >0.25 mm水稳性团聚体含量的提高能增加土壤粗糙度、增强土壤抗侵蚀能力、降低土壤容重、改善土壤孔隙度、提高土壤持水能力,为作物生长提供优良的土壤环境,这与土壤有机碳在团聚体中的合理分布密切相关^[2,13-14]。绿肥还田后促使土壤有机碳在团聚体中的合理分布是稳定土体结构、改善土壤物理性状、增强土壤功能的前提和基础。

华北平原是我国粮食主产区,冬小麦(*Triticum aestivum*)—夏玉米(*Zea mays*)周年轮作是其典型的粮食种植模式。水资源短缺、氮肥过量投入严重制约着华北平原粮食生产的可持续性^[15]。压减严重依赖灌溉地下水的冬小麦种植面积、实行地下水漏斗区域冬小麦季节性休耕是国家保护地下水资源、解决水资源危机的一个重要策略^[16]。提高土壤持水能力,增强土壤抗旱性,是高效利用降水资源、减轻华北平原粮食生产中水资源短缺的一个重要途径^[17]。土壤持水性能与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度呈正相关,具有团粒结构的土壤大小孔隙比例适当,能有效改善土壤持水性能^[18]。过量施氮会加快土壤有机质矿化,降低土壤有机碳含量^[19],破坏土壤团粒结构稳定性,导致土壤孔隙度下降,影响土壤持水能力。华北冬春季大风发生频率高、夏季降水集中,土壤易发生风蚀、水蚀,而过量施氮后土壤结构稳定性的下降会降低土壤抗侵蚀能力。采用有效措施合理减氮、固碳对形成土壤团粒结构、改善土壤物理性状、增强土壤持水能力与抗侵蚀能力,促进华北平原粮食的绿色生产具有重大作用。

豆科绿肥含氮量高、品质优,能替代部分化肥氮投入^[20],提高土壤新碳形成效率^[21]。毛叶苕子(*Vicia villosa*)是一种品质优良的越年生豆科绿肥作物。利用华北平原地下水漏斗区域冬小麦季节性休耕产生的冬春闲田种植毛叶苕子可替代部分化肥氮,是实现“有机肥替代化肥”“化肥减施”目标的一种环境友好型方式^[22]。毛叶苕子腐解过程中产生的多种类型的有机胶结剂能促进土壤团聚体有机碳的合理分布,有利于水稳性大团聚体的形成,对增加土壤孔隙数量,提高土壤结构稳定性,改善土壤物理性状,增强土壤抗侵蚀能力、持水能力,缓解华北平原地下水漏斗区域粮食生产水资源危机具有重大意义。但目前关于利用华北地下水漏斗区域冬小麦季节性休耕所形成的冬春闲田种植豆科冬绿肥毛叶苕子部分替代化肥氮后,土壤有机碳的变化如何影响团聚体的大小和分布?土壤团聚体的变化又如何影响土壤的稳定性、破坏率、可侵蚀因子、容重、孔隙度及持水性还鲜有报道。本研究在华北平原地下水漏斗区域冬小麦季节性休耕形成的冬春闲田种植毛叶苕子,研究豆科冬绿肥和施氮水平对土壤水稳性团聚体组成、团聚体有机碳分布、团聚体稳定性参数、土壤容重、孔隙度、持水性的影响特征,并进一步明确它们之间的相关关系,以期从绿肥促进土壤团聚体有机碳的合理分布改善土壤物理性状方面为揭示绿肥部分替代化肥氮实现作物稳产增产机制提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于2020年8月在位于华北地下水漏斗区域的河北省农林科学院旱作农业研究所衡水市深州试验站(114°47' E, 37°44' N, 海拔21 m)开展。试验区域属于温带大陆性季风气候,年平均气温13.6℃,年平均降水量545.9 mm。随着国家地下水漏斗区域冬小麦季节休耕策略的实施,该区域传统粮食种植制度由冬小麦—夏玉米一年两作为主变为一年一季夏玉米为主。供试土壤类型为壤质底黏潮土,0~20 cm土层土壤基本理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计,主处理为冬闲田(winter fallow fields, FF)、冬闲田种植毛叶苕子并全量还田(total returning of hairy vetch being planted in winter fallow field, HV)2种植模式,副处理为玉米的3个氮肥用量水平,分别为不施氮肥(0N)、50%氮肥(50%N)、常规施氮(100%N),其中常规施氮量为270.0 kg·hm⁻²。每处理设3次重复,试验小区面积为6 m×6 m=36 m²,随机区组排列。供试主作物玉米、豆科冬绿肥毛叶苕子品种分别为郑单958、土库曼,试验开始前茬作物为玉米。毛叶苕子在有效降水前均匀撒播于玉米株行间,撒播量为90 kg·hm⁻²,2020、2021年撒播时间分别为8月12日、8月19日,翌年5月20日采用机械粉碎还田,还田深度10~15 cm,生长期间不施肥、不灌溉。玉米株行距为0.30 m×0.60 m,2021、2022年播种时间分别为6月10日、6月9日,播种前50%氮肥和全部磷钾肥(P₂O₅:180.0 kg·hm⁻²、K₂O:150.0 kg·hm⁻²)作底肥随整地施入,剩余50%氮肥在拔节期—喇叭口期随有效降水人工追施。为保证玉米出苗,在播种前每小区灌水4 m³。2021、2022年玉米果穗收获时间分别为9月26日、9月28日,玉米秸秆于翌年随同毛叶苕子一并还田。

表1 0~20 cm 土层土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the 0–20 cm depth soil

pH	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
8.07	19.30	1.19	1.37	20.14	93.32	21.17	179.59

1.3 土样采集与测定

2022年9月28日玉米收获后,选取FF、HV两个主处理下茬玉米0N、50%N、100%N氮肥用量水平副处理小区进行土样采集。每小区随机选取3个点用土壤铲挖取0~10 cm、10~20 cm土层原状土1.5 kg并装于硬质塑料盒用于测定土壤团聚体和有机碳含量,同时用环刀采集土样测定土壤容重(bulk density, BD)、总孔隙度(total porosity, TP)、毛管孔隙度(capillary porosity, CP)、非毛管孔隙度(non-capillary porosity, NCP)^[23]。

在室内将采回的原状土分成2部分。一部分用于测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量。一部分沿土体自然结构轻轻掰成直径为10~12 mm的土块,采用干筛法^[23]、湿筛法^[24]分别测定>5.00 mm、2.00~5.00 mm、1.00~2.00 mm、0.50~1.00 mm、0.25~0.50 mm、<0.25 mm等6个筛级的土壤机械稳定性团聚体含量和水稳性团聚体含量。收集各粒级水稳性团聚体并将其烘干、粉碎研磨后测定各粒径团聚体中的有机碳(aggregate organic carbon, AOC)含量。土壤有机碳含量和团聚体有机碳含量均采用重铬酸钾外加热法^[24]测定。

1.4 玉米产量测定

玉米完全成熟后,掰下每小区中间两行玉米所有果穗并放于背阴处风干,风干后用手摇玉米脱粒机(万丰,山东临沂)脱粒称重测产,同时测定籽粒含水量,按照14%安全含水量折算各小区的产量。

1.5 数据处理与分析

平均重量直径(mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)、团聚体破坏

率 (percentage of aggregate destruction, PAD)、土壤可蚀性 (soil erodibility K-factor, K) 等水稳定性团聚体稳定性参数的计算公式分别如下:

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

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \times \log X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

$$PAD(\%) = \frac{MR_{0.25} - R_{0.25}}{MR_{0.25}} \times 100 \quad (3)$$

$$K = 7.954 \times \left[0.0017 + 0.0494 \times \exp \left(-0.5 \times \frac{\lg GMD + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: W_i 、 X_i 分别为 i 粒级团聚体的质量百分比 (%)、平均直径 (mm); n 为粒径分组的组数; $MR_{0.25}$ 、 $R_{0.25}$ 分别为 >0.25 mm 的机械稳定性团聚体总含量、水稳定性团聚体总含量。

采用土壤最大持水量 (maximum water-holding capacity, MWHC)、毛管持水量 (capillary water-holding capacity, CWHC)、非毛管持水量 (non capillary water-holding capacity, NCWHC) 等指标表征土壤持水性能, 计算公式为:

$$W = 10000 \times P \times h$$

式中: W 表示持水量 ($t \cdot hm^{-2}$), P 表示孔隙度 (%), h 表示土层厚度 (m)。

采用 Microsoft Excel 2010、Origin 2022 软件进行数据整理与作图。采用 SPSS 24.0 软件进行统计分析。采用 LSD 法进行不同处理间数据的显著性检验 ($P=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 水稳性团聚体组成变化

与 FF 模式相比, HV 模式 0~10 cm、10~20 cm 土层 $R_{0.25}$ 分别显著提高了 8.95%、13.13% (图 1)。HV 模式下, 0~10 cm 土层 $R_{0.25}$ 在 50%N、100%N 处理间差异不显著, 但 10~20 cm 土层 $R_{0.25}$ 差异显著, 表明 HV 模式下减氮 50% 不会显著降低 0~10 cm 土层 $R_{0.25}$, 但显著降低 10~20 cm 土层 $R_{0.25}$ 。HV50%N 处理 0~10 cm 土层 $R_{0.25}$ 较 FF100%N 显著提高 6.74%; HV0N 较 FF100%N 提高 1.03%, 差异不显著。HV0N、HV50%N 处理 10~20 cm 土层 $R_{0.25}$ 分别比 FF100%N 显著提高了 2.65%、11.21%, 说明 HV 模式能补偿氮肥减施对 0~10 cm、10~20 cm 土层水稳性大团聚体含量的负影响。HV50%N 处理 0~10 cm 土层 >5.00 mm、0.25~0.50 mm 水稳性团聚体含量均显著高于 FF100%N, 2.00~5.00 mm、1.00~2.00 mm、0.50~1.00 mm 水稳性团聚体含量差异不显著; 10~20 cm 土层 >5.00 mm、2.00~5.00 mm、1.00~2.00 mm、0.25~0.50 mm 水稳性团聚体含量均显著高于 FF100%N, 0.50~1.00 mm 水稳性团聚体含量差异不显著, 表明 HV 模式能弥补减氮 50% 对 0~10 cm、10~20 cm 土层 >0.25 mm 各粒级水稳性团聚体含量的不利影响。

2.2 水稳定性团聚体稳定性参数变化

与 FF 相比, HV 模式 0~10 cm、10~20 cm 土层团聚体 MWD 分别显著提高了 0.34、0.54 mm, GMD 分别显著增加了 0.08、0.14 mm, PAD 分别显著降低了 8.83%、12.14%, K 值分别显著降低了 0.03、0.04 (图 2), 说明 HV 模式能明显增强 0~10 cm、10~20 cm 土层团聚体的稳定性, 提升土壤抗侵蚀能力。

FF、HV 两种模式下 0~10 cm、10~20 cm 土层 MWD、GMD 均随施氮水平提高而显著增加, PAD、K 值则显著降低。FF 模式下, 3 个施氮水平处理间 0~10 cm、10~20 cm 土层 MWD、GMD 差异均显著, 其中, 0N $<$ 50%N $<$ 100%N。HV 模式下, 50%N、100%N 处理 0~10 cm、10~20 cm 土层 MWD、GMD 均显著高于 0N 处理, 其中 50%N、100%N 处理间 10~20 cm 土层 GMD 差异显著, 其他差异不显著。HV、FF 模式下 50%N、100%N 处

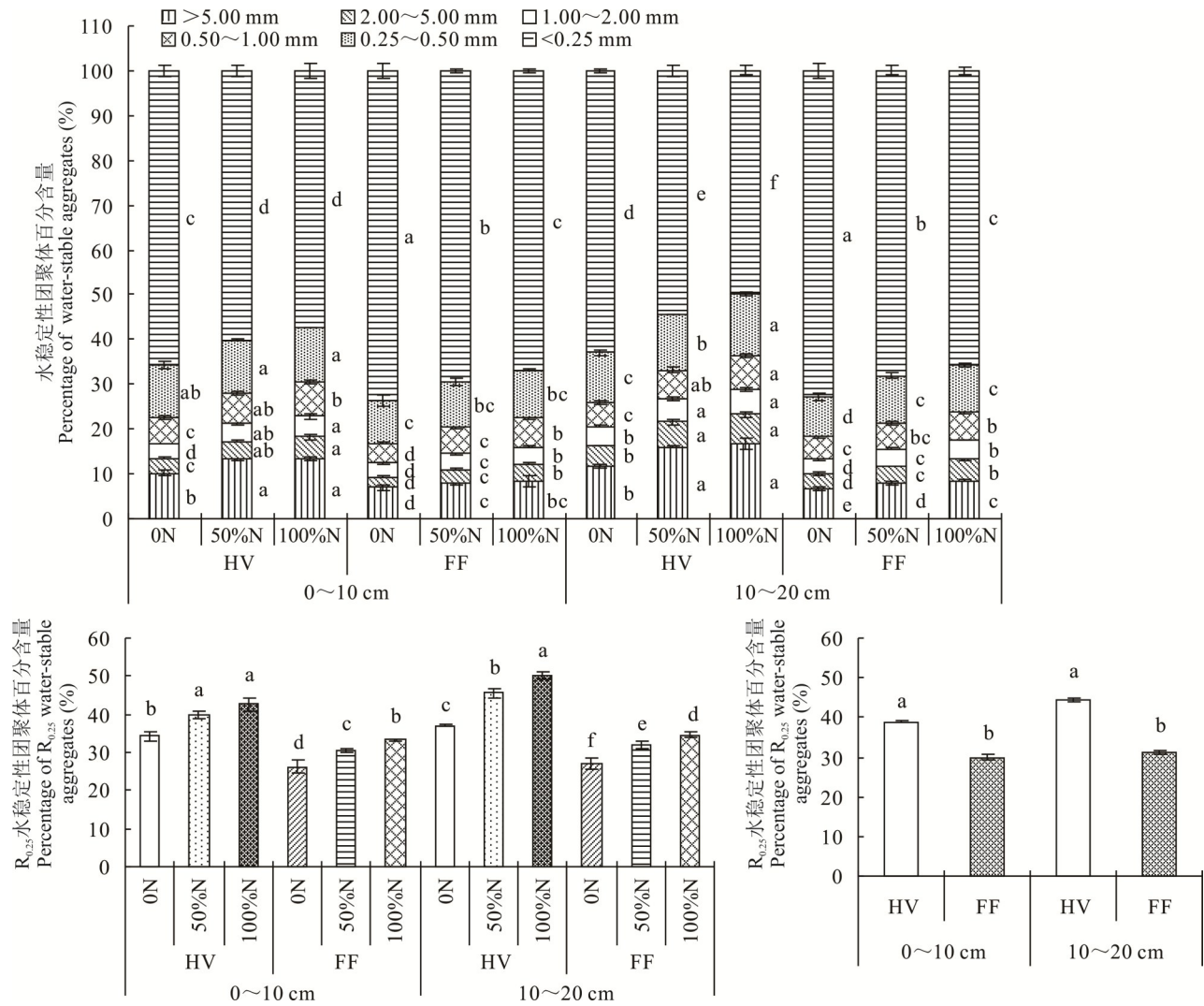


图1 土壤水稳定性团聚体组成变化

Fig. 1 Changes in composition of soil water-stable aggregates

不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in the same soil layer, the same below.

理0~10 cm、10~20 cm 土层PAD、K值均较0N显著降低。HV模式下,100%N处理0~10 cm 土层PAD、K值较50%N下降均不显著,而10~20 cm 土层下降均显著。

与FF100%N相比,HV50%N、HV0N处理0~10 cm 土层MWD分别增加了0.32、0.08 mm,GMD分别增加了0.07、0.01 mm,PAD分别降低了6.82%、3.45%,K值分别降低了0.022、0.004;10~20 cm 土层土壤MWD分别增加了0.52、0.19 mm,GMD分别增加了0.13、0.03 mm,PAD分别降低了11.41%、3.78%,K值分别降低了0.035、0.011,差异均显著,说明HV模式能阻止不施氮肥、减氮50%所导致的0~10 cm、10~20 cm 土层土壤团聚体稳定性的下降。

2.3 土壤容重、孔隙度、持水性变化

种植模式对0~10 cm、10~20 cm 土层土壤BD、TP、CP、NCP、MWHC、CWHC、NCWHC影响均显著(表2)。与FF模式相比,HV模式0~10 cm 土层BD降低5.99%,TP、CP、NCP分别提高5.89%、1.47%、4.42%,MWHC、CWHC、NCWHC分别增加15.01%、6.41%、27.08%,差异均达极显著水平($P < 0.01$);10~20 cm 土层BD下降7.31%,TP、CP、NCP分别提高5.02%、0.76%、4.25%,MWHC、CWHC、NCWHC分别增加13.11%、3.32%、27.86%,其中,CP、CWHC差异均达显著性水平($P < 0.05$),其他均达极显著性水平($P < 0.01$)。施氮水

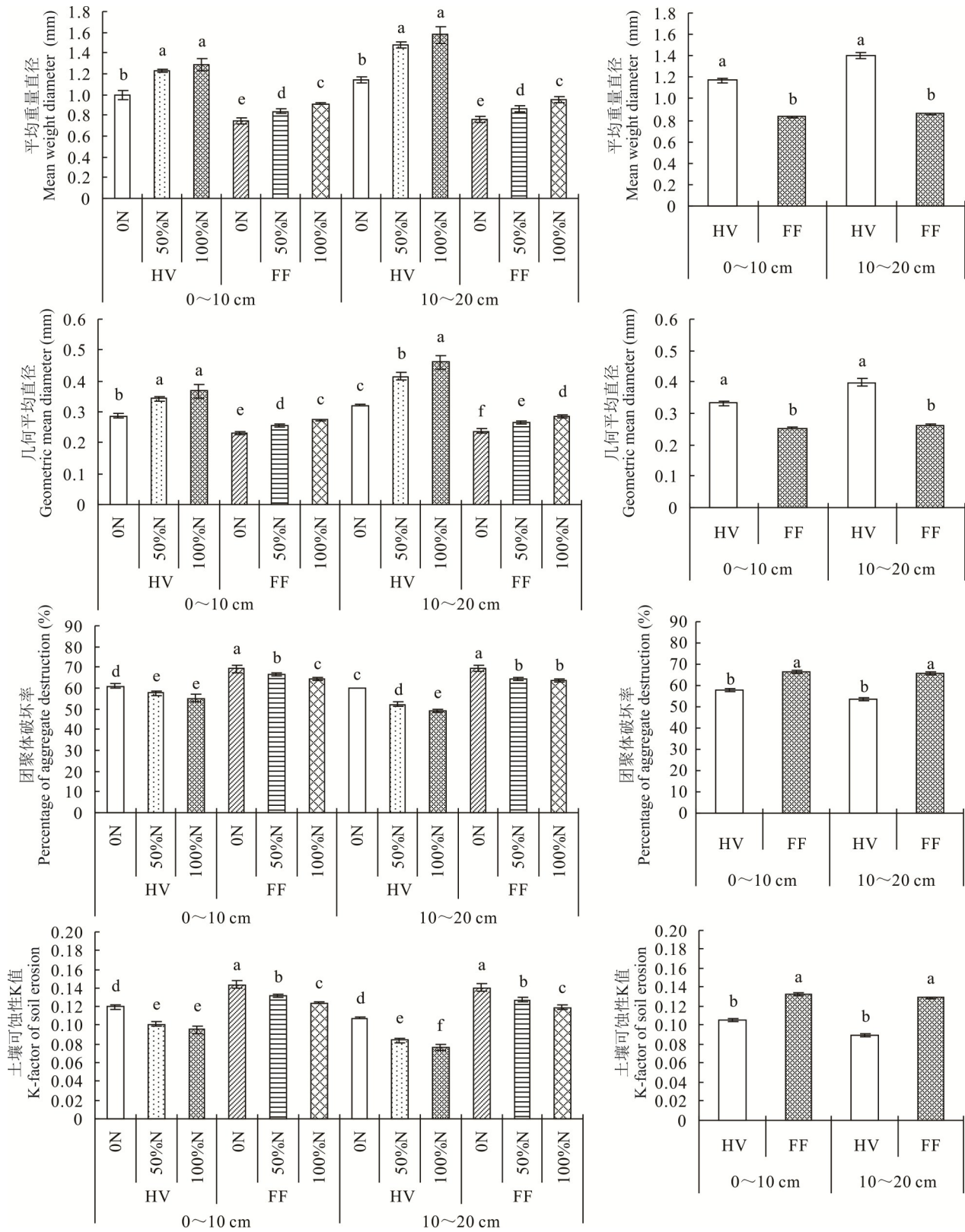


图 2 土壤团聚体稳定性参数变化

Fig. 2 Changes in stability parameters of soil aggregates

平对 0~10 cm 土层 BD 影响极显著,对 10~20 cm 土层 BD 影响不显著,对 0~10 cm、10~20 cm 土层 TP、CP、NCP、MWHC、CWHC、NCWHC 影响均显著。随施氮水平提高,0~10 cm、10~20 cm 土层 BD 呈下降趋势,TP、CP、NCP、MWHC、CWHC、NCWHC 均呈增加趋势。

表2 毛叶苕子和施氮水平对土壤物理性状的影响

Table 2 Effects of hairy vetch and nitrogen rate on the soil physical properties

土层	种植模式	施氮	土壤容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	最大持水量	毛管持水量	非毛管持水量
Soil layer	Cropping pattern	N treatment	Bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Total porosity (%)	Capillary porosity (%)	Non-capillary porosity (%)	Maximum water-holding capacity ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	Capillary water-holding capacity ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	Non-capillary water-holding capacity ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)
0~10 cm	HV	0%N	1.43±0.01c	40.02±2.72bc	23.54±0.20c	16.48±2.92b	400.20±27.20bc	235.40±2.00c	164.80±29.20b
		50%N	1.41±0.01c	46.63±2.15a	24.26±0.09b	22.37±2.07a	466.30±21.52a	242.60±0.90b	223.70±20.70a
		100%N	1.40±0.02c	48.86±0.89a	25.43±0.87a	23.42±0.60a	488.57±8.94a	254.33±8.65a	234.23±6.05a
	FF	0%N	1.52±0.01a	35.30±2.33c	21.37±0.76e	13.93±2.88b	353.00±23.30c	213.70±7.63e	139.30±28.84b
		50%N	1.51±0.01a	40.38±0.92b	22.99±0.23d	17.39±0.99b	403.80±9.23b	229.93±2.31d	173.87±9.89b
		100%N	1.48±0.01b	42.15±0.93b	24.46±0.85ab	17.69±0.89b	421.47±9.31b	244.60±8.49ab	176.87±8.94b
ANOVA									
CP			**	**	**	**	**	**	**
N			**	**	**	**	**	**	**
CP×N			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
10~20 cm	HV	0%N	1.52±0.03ab	40.52±1.65b	23.01±0.42a	17.51±2.07bc	405.20±16.46b	230.13±4.22a	175.07±20.67bc
		50%N	1.48±0.02b	43.39±1.39ab	24.27±0.92a	19.13±1.15ab	433.93±13.90ab	242.67±9.23a	191.27±11.49ab
		100%N	1.44±0.05b	45.90±1.32a	23.99±0.97a	21.90±2.23a	458.97±13.25a	239.93±9.68a	219.03±22.32a
	FF	0%N	1.61±0.10a	34.75±0.92d	22.07±0.49b	12.68±1.01d	347.50±9.17d	220.73±4.87b	126.77±10.07d
		50%N	1.60±0.01a	38.22±1.35c	23.50±0.52a	14.72±0.83c	382.20±13.49c	235.03±5.20a	147.17±8.31c
		100%N	1.58±0.09ab	41.79±1.40b	23.41±0.97a	18.39±0.45b	417.93±14.00b	234.07±9.72a	183.87±4.52b
ANOVA									
CP			**	**	*	**	**	*	**
N			ns	**	*	**	**	*	**
CP×N			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注: *表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$ 。CP表示种植模式, N表示施氮处理。CP×N表示种植模式与施氮处理交互作用。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: * means $P<0.05$, ** means $P<0.01$. CP means cropping pattern, N means nitrogen application rate, CP×N means the interaction effect between cropping pattern and nitrogen application rate. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments. The same below.

与FF100%N相比, HV50%N、HV0N处理0~10 cm土层BD分别下降了0.07、0.05 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 差异均显著; TP分别提高了4.48%、-2.13%, NCP分别提高了4.68%、-1.21%, 其中, HV50%N处理TP、NCP提高显著, HV0N处理二者变化不明显; CP分别降低了0.20%、0.92%, 其中HV50%N下降不明显, HV0N下降显著。HV50%N、HV0N处理10~20 cm土层BD较FF100%N分别下降了0.10、0.06 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, TP分别提高了1.60%、-1.27%, CP分别提高了0.86%、-0.40%、NCP分别提高了0.74%、-0.88%, 变化均不明显。与FF100%N相比, HV50%N、HV0N处理0~10 cm、10~20 cm土层MWHC、CWHC、NCWHC变化特征与TP、CP、NCP相同, 表明HV模式下, 合理减氮能显著降低0~10 cm土层土壤容重, 明显提高0~10 cm土层土壤总孔隙度、非毛管孔隙度及最大持水量、非毛管持水量。

2.4 土壤有机碳含量变化

HV模式能明显提高土壤有机碳含量(图3)。与FF相比, HV模式0~10 cm、10~20 cm土层SOC含量分别显著增加了0.87、0.76 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。HV模式下, 50%N处理0~10 cm、10~20 cm土层SOC含量分别比100%N增加了0.12、0.15 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; FF模式下, 50%N处理分别增加了0.28、-0.27 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 两种模式下50%N处理0~10 cm、10~20 cm土层SOC含量较100%N变化均不显著($P>0.05$)。HV模式下, 0N处理0~10 cm土层SOC含量较

100%N下降了 $0.08 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,差异不明显,10~20 cm 土层下降了 $0.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,差异显著;FF 模式下,0N 处理 0~10 cm、10~20 cm 土层 SOC 含量较 100%N 分别下降了 1.24 、 $1.53 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,差异均显著。与 FF100%N 相比, HV0N、HV50%N 处理 0~10 cm 土层 SOC 含量分别增加 0.46% 、 0.66% ;HV50%N 处理 10~20 cm 土层 SOC 含量增加 0.58% ,HV0N 降低 0.53% ,差异均不显著,说明 HV 模式能补充土壤有机碳,弥补不施氮肥、减氮 50% 对土壤有机碳含量的负影响。

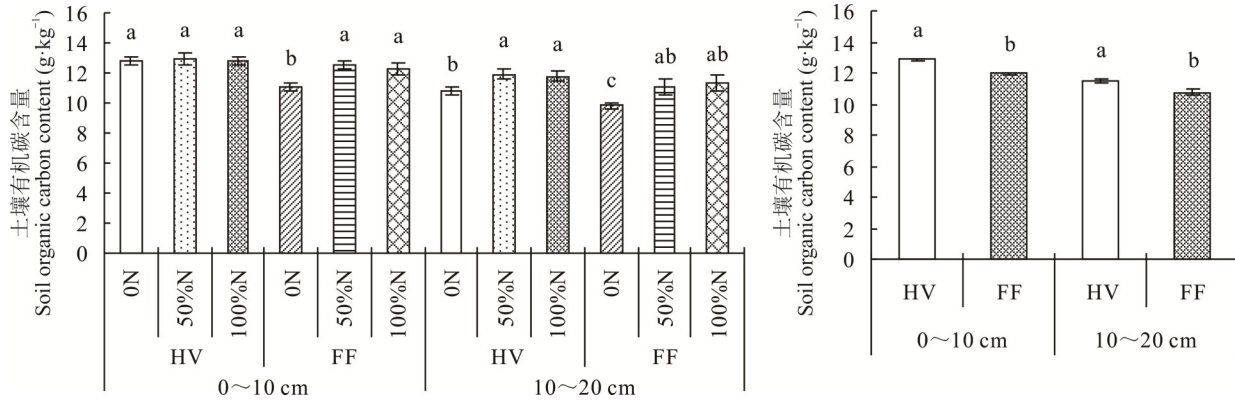


图 3 土壤有机碳含量变化

Fig. 3 Changes in soil organic carbon

2.5 土壤水稳性团聚体有机碳含量变化

0~10 cm 土层 AOC 含量均高于 10~20 cm 土层(表 3)。0~10 cm、10~20 cm 土层 $>0.25 \text{ mm}$ 的各粒径 AOC 含量均高于 $<0.25 \text{ mm}$ 的团聚体。与 FF 相比,HV 模式 0~10 cm 土层 $>5.00 \text{ mm}$ 、 $2.00\sim 5.00 \text{ mm}$ 、 $1.00\sim 2.00 \text{ mm}$ 、 $0.50\sim 1.00 \text{ mm}$ 、 $0.25\sim 0.50 \text{ mm}$ 、 $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体 AOC 含量分别提高了 0.60 、 2.26 、 3.02 、 0.91 、 1.40 、 $1.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,10~20 cm 土层分别提高了 0.48 、 2.42 、 2.17 、 1.38 、 1.66 、 $1.19 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,差异均显著,表明 HV 模式能明显提高 0~10 cm、10~20 cm 土层各粒级 AOC 含量。

施氮水平对 0~10 cm、10~20 cm 土层各粒径 AOC 含量均有极显著影响($P<0.01$)。FF、HV 两种模式下各粒径 AOC 含量均随施氮水平提高而增加。HV 模式下,除 $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体外,50%N 和 100%N 处理间 0~10 cm 土层其他各粒径 AOC 含量差异不显著($P>0.05$),表明过量施氮不能显著提高 HV 模式下 0~10 cm 土层 $>0.25 \text{ mm}$ 各粒径团聚体有机碳含量。FF 模式下,0N、50%N、100%N 处理 0~10 cm 土层 $>0.25 \text{ mm}$ 各粒径 AOC 含量差异均显著($P<0.05$)。HV 模式下,50%N、100%N 处理 10~20 cm 土层 $>5.00 \text{ mm}$ 、 $2.00\sim 5.00 \text{ mm}$ 、 $1.00\sim 2.00 \text{ mm}$ 团聚体 AOC 含量均显著高于 0N,而 50%N、100%N 处理间差异不明显;0N、50%N、100%N 处理 $<0.25 \text{ mm}$ 粒径团聚体 AOC 含量差异均显著。FF 模式下,0N、50%N、100%N 处理间 10~20 cm 土层 $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体 AOC 含量差异不明显;除 $0.50\sim 1.00 \text{ mm}$ 粒径外,50%N、100%N 处理 $>0.25 \text{ mm}$ 的各粒径 AOC 含量均显著高于 0N;50%N、100%N 处理 $>5 \text{ mm}$ 、 $0.50\sim 1.00 \text{ mm}$ 团聚体 AOC 含量差异不显著,其他各粒径差异均显著。

与 FF100%N 相比,HV50%N 处理 0~10 cm 土层 $2.00\sim 5.00 \text{ mm}$ 、 $1.00\sim 2.00 \text{ mm}$ 、 $0.25\sim 0.50 \text{ mm}$ 、 $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体 AOC 含量分别提高了 2.02 、 2.08 、 0.96 、 $0.68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,差异均显著; $>5.00 \text{ mm}$ 、 $0.50\sim 1.00 \text{ mm}$ 差异不明显;HV0N 处理 $2.00\sim 5.00 \text{ mm}$ 、 $1.00\sim 2.00 \text{ mm}$ 、 $0.50\sim 1.00 \text{ mm}$ 、 $0.25\sim 0.50 \text{ mm}$ 、 $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体 AOC 含量变化不明显。HV50%N 处理 10~20 cm 土层 $2.00\sim 5.00 \text{ mm}$ 、 $1.00\sim 2.00 \text{ mm}$ 、 $0.50\sim 1.00 \text{ mm}$ 、 $0.25\sim 0.50 \text{ mm}$ 、 $<0.25 \text{ mm}$ 团聚体 AOC 含量分别较 FF100%N 提高了 2.42 、 1.76 、 0.99 、 1.02 、 $0.87 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,差异均显著, $>5.00 \text{ mm}$ 差异不明显。除 0N 处理 10~20 cm 土层 $>5.00 \text{ mm}$ 团聚体 AOC 含量显著小于 FF100%N 处理

表3 毛叶苕子和施氮水平对水稳性团聚体有机碳含量的影响

Table 3 Effects of hair vetch and nitrogen application rate on the organic carbon contents of water-stability aggregates ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土层 Soil layer	种植模式 Cropping pattern	施氮水平 N rate	>5.00 mm	2.00~5.00 mm	1.00~2.00 mm	0.50~1.00 mm	0.25~0.50 mm	<0.25 mm	
0~10 cm	HV	0%N	13.85±0.22c	17.09±0.72b	18.75±0.45b	17.13±0.48ab	15.35±0.10b	9.19±0.31c	
		50%N	14.47±0.26ab	18.98±0.39a	19.83±0.24a	17.61±0.85ab	16.40±0.19a	9.85±0.16b	
		100%N	14.87±0.24a	19.01±0.42a	19.91±0.62a	17.89±0.46a	16.42±0.17a	10.18±0.08a	
	FF	0%N	13.34±0.15d	15.24±0.17c	15.26±0.52d	15.21±0.26c	13.87±0.12d	7.99±0.53d	
		50%N	13.83±0.19c	16.08±0.40b	16.43±0.33c	16.84±0.22b	14.65±0.38c	8.77±0.27cd	
		100%N	14.23±0.03b	16.98±0.23b	17.75±0.60b	17.85±0.57a	15.44±0.22b	9.16±0.06c	
	ANOVA								
	CP			**	**	**	**	**	**
	N			**	**	**	**	**	**
CP×N			ns	ns	ns	*	*	ns	
10~20 cm	HV	0%N	12.42±0.26b	14.14±0.18b	15.71±0.26b	14.54±0.34d	14.04±0.10c	7.96±0.30c	
		50%N	13.37±0.41a	16.46±1.04a	16.91±0.30a	16.32±0.60b	15.08±0.38b	8.50±0.10b	
		100%N	13.69±0.77a	16.99±0.92a	17.43±0.47a	17.69±0.39a	15.93±0.39a	9.14±0.28a	
	FF	0%N	11.81±0.23c	12.70±0.53d	13.88±0.27d	14.40±0.67d	12.63±0.22e	7.18±0.40d	
		50%N	12.78±0.18ab	13.59±0.16c	14.52±0.09c	14.69±0.62cd	13.36±0.12d	7.21±0.41d	
		100%N	13.45±0.23a	14.04±0.16b	15.15±0.31b	15.32±0.16c	14.06±0.29c	7.63±0.27cd	
	ANOVA								
	CP			*	**	**	**	**	**
	N			**	**	**	**	**	**
CP×N			ns	ns	ns	*	ns	ns	

外,其他各粒径变化不明显。表明HV模式能弥补减氮50%对0~10 cm、10~20 cm土层各粒径AOC含量的不利影响,甚至可弥补不施氮所造成的除>5.00 mm外其他各粒径AOC含量的降低效果。

由图4可知,0~10 cm、10~20 cm土层各粒级AOC含量与SOC含量均呈极显著线性正相关,表明提高SOC含量有利于提高0~10 cm、10~20 cm土层各粒级土壤水稳定性AOC含量。

2.6 玉米籽粒产量变化

由图5可知,HV较FF显著增产 $807.71 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,表明HV模式能明显提高玉米产量。HV、FF两种模式下,随施氮水平提高,玉米产量均呈增加的趋势。FF模式下,100%N分别比50%N、0N显著增产 3165.34 、 $2379.26 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,说明冬闲田模式下提高施氮水平能显著增加玉米产量。HV模式下,0N处理玉米产量比100%N降低 $2317.25 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,差异显著;50%N比100%N降低 $67.18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,差异不显著,表明毛叶苕子还田模式下过量施氮玉米增产不明显。HV50%N处理较FF100%N增产 $218.20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,差异不明显,表明HV模式能降低减氮50%所造成的玉米产量损失。

2.7 相关与回归分析

>0.25 mm的各粒径水稳定性团聚体含量及总量($R_{0.25}$)与其团聚体有机碳含量均呈显著或极显著正相关,<0.25 mm的水稳定性团聚体含量($r_{0.25}$)与其团聚体有机碳含量呈极显著负相关。0~10 cm、10~20 cm土层MWD、GMD与>0.25 mm的各粒径水稳定性团聚体含量均呈极显著正相关,而PAD、K则与其呈极显著负相关。0~10 cm、10~20 cm土层MWD、GMD与 $R_{0.25}$ 均呈极显著正相关,与 $r_{0.25}$ 均呈极显著负相关,而PAD、K均与MWD、GMD呈相反变化规律。0~10 cm、10~20 cm土层BD与>0.25 mm的各粒径水稳定性团聚体含量及总

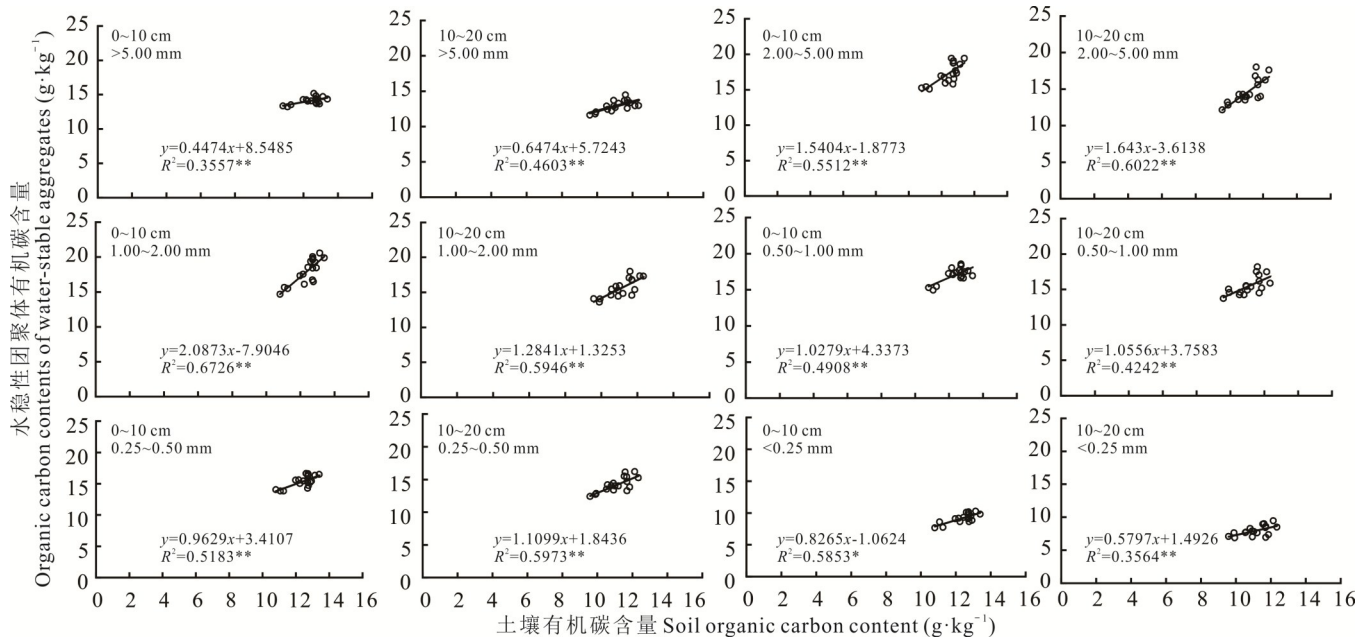


图 4 水稳性团聚体有机碳含量与土壤有机碳含量的相关关系

Fig. 4 Correlation between organic carbon contents of each size of water-stable aggregates and soil carbon contents

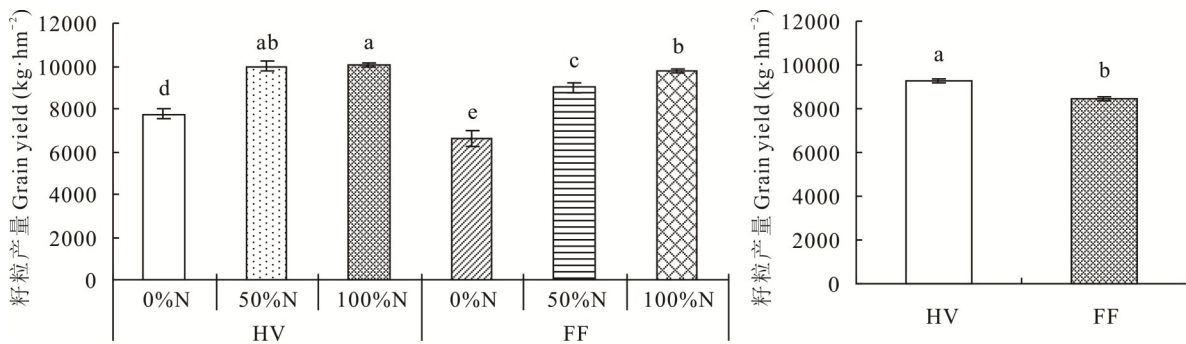


图 5 毛叶苕子和施氮水平对玉米产量的影响

Fig. 5 Effects of hairy vetch and nitrogen application rate on the yield of maize

量($R_{0.25}$)均呈显著或极显著负相关,与 $r_{0.25}$ 呈极显著正相关,而 TP、CP、NCP、MWHC、CWHC、NCWHC 则与 >0.25 mm 的各粒径水稳性团聚体含量及总量($R_{0.25}$)均呈显著或极显著正相关(图 6)。

由表 4 可知,玉米产量与 0~10 cm、10~20 cm 土层 MWD、GMD 呈极显著线性正相关,与 PAD、K 呈极显著线性负相关;与 0~10 cm、10~20 cm 土层土壤 TP、CP、NCP、MWHC、CWHC、NCWHC 呈极显著线性正相关,与 0~10 cm 土层 BD 呈显著线性负相关,与 10~20 cm 土层 BD 呈线性负相关,但相关性不显著。

3 讨论

3.1 毛叶苕子和施氮水平对水稳性团聚体组成的影响

土壤团聚体由 >0.25 mm 的大团聚体和 <0.25 mm 的微团聚体组成。Elliott^[25]认为大团聚体是由微团聚体通过有机胶合剂胶结而成,土壤团聚度越高,土壤结构越稳定,质量越佳。前人研究表明,绿肥在腐殖化过程中能增加土壤有机碳含量,促进微团聚体向大团聚体转化,提高 >0.25 mm 粒径水稳性团聚体的含量^[26-27]。本研究表明,HV 模式能提高各土层 >0.25 mm 各粒径水稳性团聚体的含量,显著提高 $R_{0.25}$,与前人研究结果相类似,这可能与毛叶苕子还田显著提高了 0~10 cm、10~20 cm 土层土壤有机碳含量,增加了土壤中有有机胶结剂数量相关。

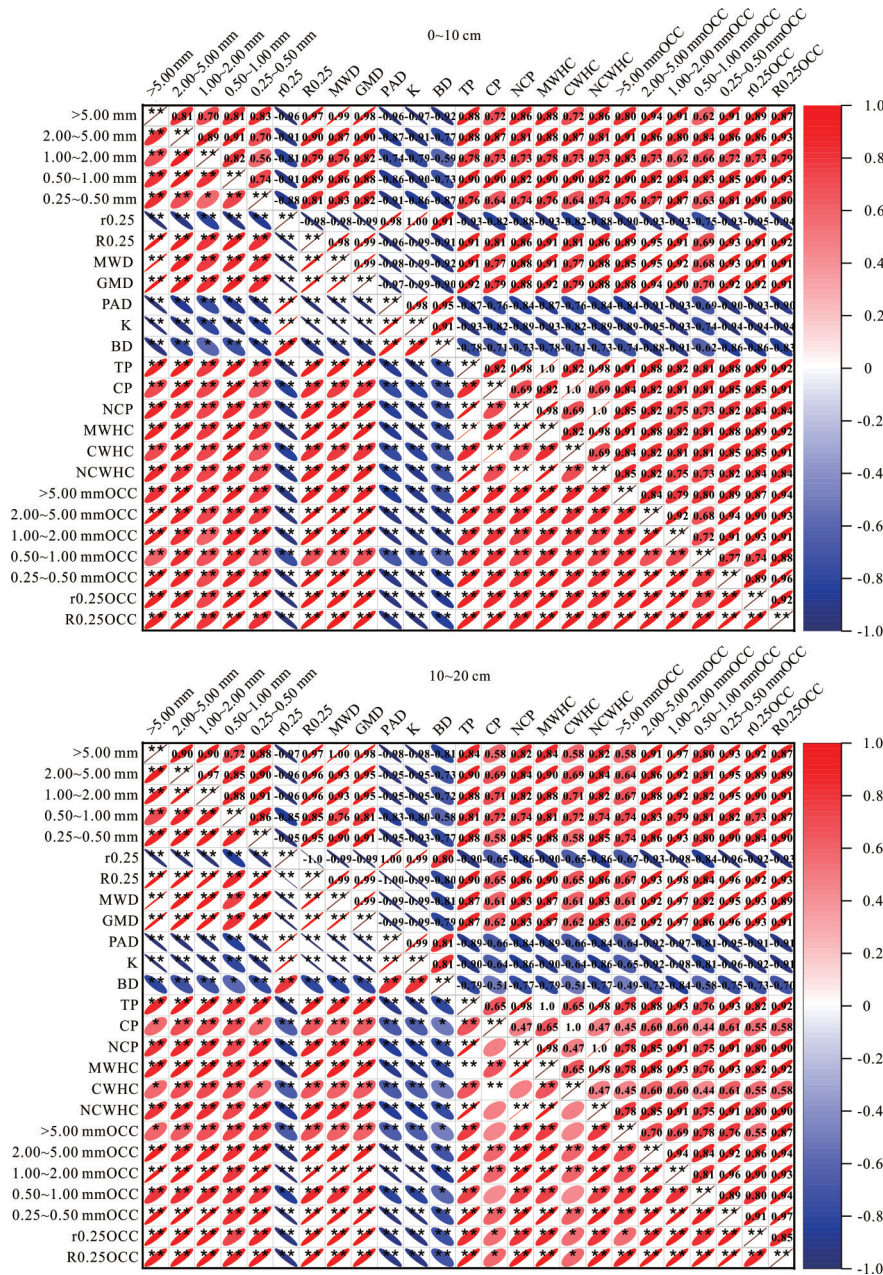


图6 各指标相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of various indicators

>5.00 mm: >5.00 mm 粒径的水稳性团聚体百分含量 Percentage of >5.00 mm water-stable aggregates; 2.00~5.00 mm: 2.00~5.00 mm 粒径的水稳性团聚体百分含量 Percentage of 2.00–5.00 mm water-stable aggregates; 1.00~2.00 mm: 1.00~2.00 mm 粒径的水稳性团聚体百分含量 Percentage of 1.00–2.00 mm water-stable aggregates; 0.50~1.00 mm: 0.50~1.00 mm 粒径的水稳性团聚体百分含量 Percentage of 0.50–1.00 mm water-stable aggregates; 0.25~0.50 mm: 0.25~0.50 mm 粒径的水稳性团聚体百分含量 Percentage of 0.25–0.50 mm water-stable aggregates; r0.25: <0.25 mm 粒径的水稳性团聚体百分含量 Percentage of <0.25 mm water-stable aggregates; R0.25: >0.25 mm 粒径的水稳性团聚体百分含量 Percentage of >0.25 mm water-stable aggregates; MWD: 平均重量直径 Mean weight diameter; GMD: 几何平均直径 Geometric mean diameter; PAD: 团聚体破坏率 Percentage of aggregate destruction; K: 土壤可蚀性 K 值 K-factor of soil erosion; BD: 容重 Bulk density; TP: 总孔隙度 Total porosity; CP: 毛管孔隙度 Capillary porosity; NCP: 非毛管孔隙度 Non-capillary porosity; MWHC: 最大持水量 Maximum water-holding capacity; CWHC: 毛管持水量 Capillary water-holding capacity; NCWHC: 非毛管持水量 Non-capillary water-holding capacity; >5.00 mm OCC: >5.00 mm 粒径的水稳性团聚体有机碳含量 Organic carbon contents of >5.00 mm water-stable aggregates; 2.00~5.00 mm OCC: 2.00~5.00 mm 粒径的水稳性团聚体有机碳含量 Organic carbon contents of 2.00–5.00 mm water-stable aggregates; 1.00~2.00 mm OCC: 1.00~2.00 mm 粒径的水稳性团聚体有机碳含量 Organic carbon contents of 1.00–2.00 mm water-stable aggregates; 0.50~1.00 mm OCC: 0.50~1.00 mm 粒径的水稳性团聚体有机碳含量 Organic carbon contents of 0.50–1.00 mm water-stable aggregates; 0.25~0.50 mm OCC: 0.25~0.50 mm 粒径的水稳性团聚体有机碳含量 Organic carbon contents of 0.25–0.50 mm water-stable aggregates; r0.25 OCC: <0.25 mm 粒径的水稳性团聚体有机碳含量 Organic carbon contents of <0.25 mm water-stable aggregates; R0.25 OCC: >0.25 mm 粒径的水稳性团聚体有机碳含量 Organic carbon contents of >0.25 mm water-stable aggregates.

表 4 玉米产量与 0~10 cm、10~20 cm 土层土壤物理性状指标的拟合方程

Table 4 Fitted equations between maize yield and soil physical indexes of 0–10 cm and 10–20 cm soil layers

土壤物理性状指标 Soil physical indexes	0~10 cm		10~20 cm	
	拟合方程 Fitted equations	R^2	拟合方程 Fitted equations	R^2
团聚体平均重量直径 MWD	$y=4537.8x+4317.2$	0.489**	$y=2745.3x+5756.2$	0.422**
团聚体几何平均直径 GMD	$y=19540x+3138.4$	0.524**	$y=10695x+5317.2$	0.451**
团聚体破坏率 PAD	$y=-166.8x+19244$	0.420**	$y=-128.39x+16537$	0.504**
土壤可蚀性 K 值 K	$y=-58001x+15772$	0.569**	$y=-39789x+13205$	0.494**
土壤容重 BD	$y=-13409x+28402$	0.244*	$y=-7377.9x+20211$	0.208
总孔隙度 TP	$y=226.23x-693.65$	0.674**	$y=272.91x-2265.9$	0.622**
毛管孔隙度 CP	$y=776.03x-9514.9$	0.649**	$y=991.6x-14321$	0.516**
非毛管孔隙度 NCP	$y=266.58x+3914.4$	0.571**	$y=286.22x+3882.2$	0.504**
土壤最大持水量 MWHC	$y=22.623x-693.65$	0.674**	$y=27.291x-2265.9$	0.622**
毛管持水量 CWHC	$y=77.603x-9514.9$	0.649**	$y=99.16x-14321$	0.516**
非毛管持水量 NCWHC	$y=26.658x+3914.4$	0.571**	$y=28.622x+3882.2$	0.504**

MWD: Mean weight diameter. GMD: Geometric mean diameter. PAD: Percentage of aggregate destruction. K: Soil erodibility factor. BD: Soil bulk density. TP: Total porosity. CP: Capillary porosity. NCP: Non-capillary porosity. MWHC: Maximum water holding capacity. CWHC: Capillary water holding capacity. NCWHC: Non-capillary water holding capacity.

合理施氮除可提高秸秆还田量、根量及根系分泌量,补偿土壤有机碳外^[28],还可通过影响土壤微生物消长,降低土壤有机碳矿化速率,促进土壤团聚化。因真菌对有机碳的储存能力比细菌更强,微生物对土壤有机碳矿化的影响与真菌/细菌有关。真菌适宜在偏酸性土壤中生长,合理施氮能降低土壤 pH 值,促进真菌生长,提高真菌/细菌,降低土壤有机碳矿化速率^[29]。过高或过低的氮素添加不利于真菌生长,过量施氮或施氮不足均可能导致真菌/细菌下降,利于土壤有机碳矿化,不利于土壤的团聚化。本研究表明,HV 模式下氮肥减施 50% 不会显著降低 0~10 cm 土层 $R_{0.25}$,但显著降低了 10~20 cm 土层 $R_{0.25}$ 。这可能因为毛叶苕子 C/N 低,还田后能迅速腐解,一方面通过腐殖化过程增加土壤有机碳含量,提供多种类型的有机胶结剂促进微团聚体向大团聚体转化,另一方面通过矿质化过程能释放出氮养分,提高土壤氮浓度,补偿氮肥减施 50% 后所导致的土壤 pH 值降低所引起的真菌/细菌的下降,有利于降低土壤有机碳矿化速率,促进土壤团聚化。因毛叶苕子机械翻压深度 < 15 cm,导致其集中于 0~10 cm 土层中,不能有效提高 10~20 cm 土层土壤有机碳含量,同时减氮 50% 后土壤 pH 值降低引起真菌/细菌下降,加快土壤有机碳矿化,导致土壤大团聚体解体,10~20 cm 土层 $R_{0.25}$ 显著下降。在生产实践中,为提高土壤团聚化,冬春闲田种植毛叶苕子并还田模式一定要配合合理减氮措施,同时还要加深土壤耕作深度。

绿肥配合合理减氮有助于微团聚体向大团聚体的转化^[9]。本研究中,毛叶苕子还田后玉米减氮 50% 能显著促进 0~10 cm、10~20 cm 土层微团聚体向大团聚体转变,其中,显著增加了 0~10 cm 土层 > 5.00 mm、0.25~0.50 mm 及 10~20 cm 土层 > 5.00 mm、2.00~5.00 mm、1.00~2.00 mm、0.25~0.50 mm 不同粒径水稳性团聚体含量,这可能与毛叶苕子在土壤微生物的作用下形成了多种类型的有机胶结剂,提高了土壤有机碳含量相关。毛叶苕子在微生物作用下所发生的腐殖化和矿质化过程对土壤有机碳积累与土壤结构稳定性的影响是一个长期的复杂过程,而本试验才进行 2 年,因此,毛叶苕子部分替代化学氮肥对土壤团聚化的影响机制还需进一步的研究与探讨。

3.2 毛叶苕子和施氮水平对土壤稳定性参数的影响

MWD、GMD 分别反映了土壤团聚体的质量状况和粒径分布^[30],团聚体破坏率(PAD)反映了团聚体经湿筛后土壤破碎的比率,土壤可蚀性 K 值反映了土壤可被侵蚀的强度^[31]。本研究表明,毛叶苕子作为绿肥还田能显著

提高 0~10 cm、10~20 cm 土层 MWD、GMD, 显著降低 PAD、K 值。张钦等^[32]分析认为, 连续种植绿肥后土壤 MWD、GMD 的提高及 PAD、K 值的下降均与土壤水稳性大团聚体相关。本研究中, 土壤 MWD、GMD 与 >0.25 mm 的各粒径土壤团聚体含量及总量均呈极显著正相关, PAD、K 与其呈极显著负相关, 而 >0.25 mm 的各粒径土壤团聚体含量及总量与其团聚体有机碳含量均呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关, 不同粒径土壤团聚体有机碳含量均与土壤有机碳含量呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关, 而毛叶苕子还田能显著提高 0~10 cm、10~20 cm 土层土壤有机碳含量, 因此, 冬闲田种植毛叶苕子并还田能显著提高土壤团聚体稳定性, 增强土壤抗侵蚀能力与其能显著提高土壤有机碳含量、增加土壤有机胶结物质相关。HV50%N、HV0N 处理 0~10 cm、10~20 cm 土层团聚体 MWD、GMD 均显著高于 FF100%N, PAD、K 值均显著低于 FF100%N, 说明毛叶苕子还田后一方面通过替代化学氮肥可降低土壤有机质矿化速度, 另一方面通过腐殖化过程可补偿土壤有机碳, 二者均有利于提高土壤水稳性大团聚体含量, 增强土壤结构稳定性和抗侵蚀力。

3.3 毛叶苕子和施氮水平对土壤容重、孔隙度、持水性的影响

土壤容重、孔隙度、持水性是用来反映土壤物理性状、评价土壤质量的重要指标^[33]。李宏图等^[34]研究表明, 绿肥翻压还田可提高土壤有机质含量, 增加团聚体有机胶结物质, 促进团粒结构形成, 增加土壤孔隙数量, 降低土壤容重, 提高土壤持水能力。景宇鹏等^[35]研究表明, 种植田菁 (*Sesbania cannabina*) 能显著降低土壤容重 4.08%, 提高总孔隙度 5.08%, 改善盐碱地土壤物理性状。段志龙等^[36]研究发现, 毛叶苕子还田土壤容重降低 11.97% 以上, 孔隙度提高 13.83% 以上, 含水量提高 164.44% 以上。本研究表明, HV 模式能显著降低 0~10 cm、10~20 cm 土层土壤容重, 提高土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、非毛管持水量, 改善土壤物理性状, 与李宏图等^[34]、段志龙等^[36]的研究结果相类似。李超等^[2]研究发现, 土壤容重、总孔隙度、饱和持水量与土壤有机碳含量均呈显著正相关。本研究相关性分析结果表明, 0~10 cm、10~20 cm 土层土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量、非毛管持水量均与 >0.25 mm 的水稳定性团聚体总量呈显著或极显著正相关, 而容重则与其呈显著或极显著负相关, >0.25 mm 的各粒径水稳定性团聚体含量及总量均与其团聚体有机碳含量呈显著或极显著正相关, 各粒径水稳定性团聚体有机碳含量与土壤有机碳含量均呈极显著正相关。因此, 毛叶苕子还田对土壤有机碳的补充是促进土壤团粒结构形成、改善土壤物理性状的前提, 对提高华北地下水漏斗区域土壤结构稳定性、增强土壤抗侵蚀能力、提高土壤持水性、增强土壤抗旱能力, 实现粮食生产的可持续发展具有重大意义。

黄寅玲等^[37]研究表明, 合理施氮能显著降低土壤容重, 这与合理施氮提高土壤有机质相关。本研究中, 施氮水平显著影响 0~10 cm 土层土壤容重, 但对 10~20 cm 土层容重影响不明显, 这可能与试验区域耕作深度浅导致氮肥在 10~20 cm 土层分布量少相关。绿肥还田能实现农田养分良性循环, 提高土壤养分含量。绿肥还田后, 合理减氮可减缓土壤有机质矿化, 提高土壤有机碳含量, 改善土壤物理性状。侣国涵等^[38]研究表明, 高量绿肥还田后, 化肥减施 15% 能显著降低土壤紧实度。聂良鹏等^[39]研究发现, 紫云英 (*Astragalus sinicus*) 配施 80% 化肥能显著降低土壤容重, 提高土壤总孔隙度和毛管孔隙度。本研究中, 毛叶苕子还田后, 不施化肥氮或减氮 50% 能显著降低 0~10 cm 土层土壤容重, 显著提高总孔隙度、非毛管孔隙度、最大持水量、非毛管持水量, 但对 0~10 cm 土层土壤毛管孔隙度、毛管持水量及 10~20 cm 土层土壤各物理性状指数影响不明显, 这可能与试验期限较短、绿肥机械翻压深度浅有关。

3.4 毛叶苕子和施氮水平对土壤团聚体有机碳分布的影响

有机碳是胶结土粒形成土壤团聚体的主要物质, 有机碳在土壤团聚体中的合理分布是促进团粒结构形成、构建作物良好生长土壤环境的关键。李婕等^[40]研究指出, 因碳含量丰富, 长期秸秆还田能显著提高土壤有机碳含量及各粒级团聚体有机碳的含量。本研究结论与之相同, 即绿肥还田能显著提高 0~10 cm、10~20 cm 土层水稳性大团聚体和微团聚体有机碳含量, 这与绿肥还田后土壤有机碳含量显著提高相关, 因为各粒级水稳性团聚体有机碳含量与土壤有机碳含量呈显著正相关。虽本试验毛叶苕子还田期限短, 但因豆科绿肥植株 C/N 低, 品质高, 分

解后能形成较多矿质结合态的稳定性有机碳,所以能提高 <0.25 mm水稳性微团聚体有机碳含量,郭鑫等^[21]的研究也表明了这一点。刘学彤等^[41]、陈晓芬等^[42]研究表明,在团聚体层次性的形成过程中,微团聚体被有机碳胶结形成大团聚体。本研究中,毛叶苕子C/N低,易被微生物分解,产生的有机碳与粘粒组成有机-无机复合体,促使微团聚体胶结成大团聚体,因此毛叶苕子还田后水稳性大团聚体有机碳含量均高于水稳性微团聚体。

毛叶苕子还田模式下,50%N、100%N处理间0~10 cm、10~20 cm土层 >0.25 mm各粒径团聚体有机碳含量差异不明显,这可能因为毛叶苕子还田后土壤中氮素浓度提高,再投入大量化学氮肥会加速有机碳矿化,不利于大团聚体的形成^[20]。因此,毛叶苕子还田下合理减氮有利于提高大团聚体有机碳含量。本研究中HV50%N处理0~10 cm、10~20 cm土层各粒径团聚体有机碳含量均高于FF100%N,表明毛叶苕子还田配合减氮50%措施有利于提高团聚体有机碳含量。

3.5 团聚体含量、有机碳含量、土壤物理指标及玉米产量之间的关系

作为主要的胶结剂,团聚体中的有机碳主要来源于土壤^[12]。本研究中,各粒径水稳定性团聚体有机碳含量与土壤有机碳含量均呈极显著线性正相关,各粒径水稳定性团聚体含量与其团聚体有机碳含量呈显著或极显著正相关。因此,毛叶苕子还田能提高土壤大团聚体的含量与其能够补充土壤有机质,产生多种类型的有机胶结剂相关。

MWD、GMD、PAD、K是反映团聚体稳定性的主要指标。MWD、GMD与PAD、K之间呈极显著负相关,即MWD、GMD值越大,PAD、K值越小,团聚体结构越稳定,土壤抗侵蚀能力越强^[31]。本研究中,0~10 cm、10~20 cm土层MWD、GMD与 >0.25 mm各粒径团聚体含量及总量呈极显著正相关,PAD、K与其则呈极显著负相关,说明增加 >0.25 mm粒径团聚体的含量能提高土壤结构稳定性,增强土壤抗侵蚀能力。毛叶苕子还田可通过提高水稳性大团聚体含量增强土壤结构稳定性和抗侵蚀能力。

水稳性大团聚体含量的增加有助于形成团粒结构,而团粒内部为毛管孔隙,团粒之间为非毛管孔隙,具有团粒结构的土壤毛管孔隙、非毛管孔隙数量和比例适当,能降低土壤容重,增强土壤持水能力。本研究中,0~10 cm、10~20 cm土层土壤TP、CP、NCP、MWHC、CWHC、NCWHC与 >0.25 mm各粒径团聚体含量及总量呈显著或极显著正相关,BD与其呈显著或极显著负相关。李超等^[2]研究表明,土壤TP、MWHC、CWHC与土壤有机碳含量均呈显著正相关,BD与土壤有机碳含量呈显著负相关。因此,毛叶苕子还田可通过增加土壤有机碳含量提高水稳性大团聚体含量,进而改善土壤物理性状指标。

土壤有机碳是影响土壤功能发挥和作物产量的核心物质^[12]。韩紫璇等^[43]研究发现,小麦产量与土壤有机碳呈显著正相关;刘学彤等^[41]研究指出,冬小麦产量与 >0.25 mm团聚体有机碳含量之间存在极显著正相关关系。本研究表明,2022年玉米产量与0~10 cm、10~20 cm土层PAD、K均呈线性极显著负相关,与0~10 cm土层BD呈线性显著负相关,与0~10 cm、10~20 cm土层MWD、GMD、TP、CP、NCP、MWHC、CWHC、NCWHC均呈极显著或显著正相关,说明提高土壤有机碳含量,可增加团聚体胶结物质,促进水稳性大团聚体形成,能提高土壤结构稳定性、改善土壤物理性状,是作物实现增产的重要前提。

4 结论

华北地下水漏斗区域冬小麦季节性休耕形成的冬春闲田种植毛叶苕子并还田可显著增加0~10 cm、10~20 cm土层土壤有机碳含量,促进有机碳在水稳性大团聚体中的分布,提高 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、TP、CP、NCP、MWHC、CWHC、NCWHC和玉米产量,降低PAD、K值和BD。相关与回归分析表明,各粒径水稳定性团聚体有机碳含量与土壤有机碳含量均呈极显著正相关, >0.25 mm各粒径水稳定性团聚体含量及总量与其团聚体有机碳含量均呈显著或极显著正相关,MWD、GMD、TP、CP、NCP、MWHC、CWHC、NCWHC与 >0.25 mm各粒径团聚体含量及总含量均呈显著或极显著正相关,PAD、K值、BD与之呈显著或极显著负相关。因此,毛叶苕子通过增加土壤有机碳含量,促进了土壤团粒结构的形成,提高了土壤结构稳定性,增强了土壤抗侵蚀能力和持水能

力,为玉米增产稳产打下了良好的环境基础。毛叶苕子对土壤氮、有机碳的输入是其部分替代氮肥、改善土壤物理性状、实现减氮增产的重要基础。

参考文献 References:

- [1] Ren Z J, Luo Y J, Wei C F. Progress in the study on field soil aggregate. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(2): 1101–1105.
任镇江, 罗友进, 魏朝富. 农田土壤团聚体研究进展. *安徽农业科学*, 2011, 39(2): 1101–1105.
- [2] Li C, Wang J, Xing W C, *et al.* Effects of green manure on physical properties of topsoil in a dryland winter wheat field. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 107–113, 121.
李超, 王俊, 邢文超, 等. 绿肥填闲种植对旱作冬小麦农田耕层土壤物理性质的影响. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 107–113, 121.
- [3] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6): 481–504.
- [4] Li Z Q, Wang J H, Zhang X. A review on the research of decomposition and nutrients release of green manure. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4): 8–16.
李增强, 王建红, 张贤. 绿肥腐解及养分释放规程研究进展. *中国土壤与肥料*, 2017(4): 8–16.
- [5] Zhang X R, Zhang W Q. Research progress of soil aggregates. *Northern Horticulture*, 2020(21): 131–137.
张旭冉, 张卫青. 土壤团聚体研究进展. *北方园艺*, 2020(21): 131–137.
- [6] Li P, Jia L, Chen Q Q, *et al.* Adaptive evaluation for agricultural sustainability of different fertilizer management options for a green manure-maize rotation system: Impacts on crop yield, soil biochemical properties and organic carbon fractions. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168170.
- [7] Lv H Q, Hu F L, Yu A Z, *et al.* Microstructure characteristics of soil aggregates of maize farmland under different utilization patterns of green manure in a desert oasis area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(6): 952–964.
吕汉强, 胡发龙, 于爱忠, 等. 荒漠绿洲区不同绿肥还田方式下玉米农田土壤团聚体微结构特征. *中国生态农业学报*, 2022, 30(6): 952–964.
- [8] Li W J, Yang J F, Peng B F, *et al.* Effects of fertilization on aggregate characteristics and organic carbon distribution in a paddy soil in Dongting Lake Plain of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20): 4007–4015.
李文军, 杨基锋, 彭保发, 等. 施肥对洞庭湖平原水稻土团聚体特征及其有机碳分布的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(20): 4007–4015.
- [9] Gan Y F, Xu Y H, Zhou F Z, *et al.* Effects of Chinese milk vetch incorporation and nitrogen reduction on different forms of Fe and Mn in aggregates of paddy soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(7): 1238–1248.
甘雅芬, 徐永昊, 周富忠, 等. 紫云英还田与氮肥减施对水稻土团聚体中各形态铁锰含量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(7): 1238–1248.
- [10] Liu X F, Liu C Z, Wang S G, *et al.* Effects of green manure on soil nutrients, aggregation, and distributions of carbon and nitrogen. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2015, 21(9): 44–47, 56.
刘小粉, 刘春增, 王守刚, 等. 套种绿肥对土壤养分、团聚性及其有机碳和全氮分布的影响. *天津农业科学*, 2015, 21(9): 44–47, 56.
- [11] Jia Y, Che Z X, Bao X G, *et al.* Effects of long-term application of green manure on water stable aggregates and carbon distribution in irrigated desert soil. *Territory & Natural Resources Study*, 2020(5): 49–54.
贾宇, 车宗贤, 包兴国, 等. 长期施用绿肥对灌溉土水稳性团聚体及其有机碳的影响. *国土与自然资源研究*, 2020(5): 49–54.
- [12] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5): 665–676.
- [13] Barthes B, Roose E. Aggregates stability as an indicator of susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 2002, 47(2): 133–149.

- [14] Zhao Q, Zhang X J, Ning X G, *et al.* Influence of winter green manure on wind erosion in farmland of north China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(8): 120–124.
赵秋, 张新建, 宁晓光, 等. 华北农田冬绿肥覆盖的抗风蚀研究. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(8): 120–124.
- [15] Qin W L, Zhang X Y, Chen S Y, *et al.* Crop rotation and N application rate affecting the performance of winter wheat under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 2018, 210: 330–339.
- [16] Zhao Q G, Shen R F, Teng Y, *et al.* Pilot progress and countermeasures on farmland rotation and fallow system in the groundwater funnel area of China. *Soils*, 2018, 50(1): 1–6.
赵其国, 沈仁芳, 滕应, 等. 我国地下水漏斗区耕地轮作休耕制度试点成效及对策建议. *土壤*, 2018, 50(1): 1–6.
- [17] Zou H T, Wang S N, Yan H L, *et al.* Effects of straw deep returning on soil structure moisture in semiarid region of Northeast China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(2): 52–60.
邹洪涛, 王胜楠, 闫洪亮, 等. 秸秆深还田对东北半干旱区土壤结构及水分特征影响. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(2): 52–60.
- [18] Liu X D, Yin G L, Wu J, *et al.* Effects of nitrogen addition on the physical properties of soil in an alpine meadow on the eastern Qinghai–Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(10): 12–21.
刘晓东, 尹国丽, 武均, 等. 青藏高原东部高寒草甸草地土壤物理性状对氮元素添加的响应. *草业学报*, 2015, 24(10): 12–21.
- [19] Jin S F. Recommended nitrogen fertilization enhances soil carbon sequestration in China’s monsoonal temperate zone. *Peer J*, 2018, 6: 1–15.
- [20] Yang Y H, Zhang S, Wang S, *et al.* Yield and nutrient concentration in common green manure crops and assessment of potential for nitrogen replacement in different regions of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(6): 39–55.
杨叶华, 张松, 王帅, 等. 中国不同区域常见绿肥产量和养分含量特征及替代氮肥潜力评估. *草业学报*, 2020, 29(6): 39–55.
- [21] Guo X, Luo H, Xu X M, *et al.* Effects of litter decomposition with different qualities on soil organic carbon content and its stability in grassland on the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(5): 83–93.
郭鑫, 罗欢, 许雪梅, 等. 不同品质凋落物分解对黄土高原草地土壤有机碳及其稳定性的影响. *草业学报*, 2023, 32(5): 83–93.
- [22] Qin W L, Zhi J F, Xie N, *et al.* Effects of partial replacement of chemical fertilizers with green manure on dry matter accumulation and yield formation of maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(13): 2549–2567.
秦文利, 智健飞, 谢楠, 等. 绿肥部分替代化肥对玉米干物质积累与产量形成的影响. *中国农业科学*, 2024, 57(13): 2549–2567.
- [23] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Determination of soil physical properties. Beijing: Science Press, 1978: 147–148.
中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978: 147–148.
- [24] Bao S D. Analysis of soil and agricultural chemistry. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30–34.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30–34.
- [25] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627–633.
- [26] Zhang D B, Yao J Y, Chen J Y, *et al.* Improving soil aggregation, aggregate-associated C and N, and enzyme activities by green manure crops in the Loess Plateau of China. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(6): 1267–1279.
- [27] Zhang Q, Yu E J, Lin H B, *et al.* Distribution and sequestration of aggregate organic carbon affected by continuous different kind of green manure cultivation. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(1): 71–78.
张钦, 于恩江, 林海波, 等. 连续种植不同绿肥的土壤团聚体碳分布及其固持特性. *中国土壤与肥料*, 2019(1): 71–78.
- [28] Yan L M, Xu X, Xia J. Different impacts of external ammonium and nitrate addition on plant growth in terrestrial ecosystems: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 1010–1018.
- [29] Li M, Zhao J N, Qin J, *et al.* Effects of nitrogen addition on microbial community in soil aggregates of *Stipa baicalensis* steppe in Inner Mongolia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(3): 1127–1137.

- 李明, 赵建宁, 秦洁, 等. 氮素添加对贝加尔针茅草原土壤团聚体微生物群落的影响. 生态学报, 2021, 41(3): 1127—1137.
- [30] Wang R J, Qiang J C R, Xue Y F, *et al.* Effect of long-term organic-manure combined with chemical fertilizers on aggregate sizes distribution and its organic and inorganic carbon on a tier soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4678—4689.
王仁杰, 强久次仁, 薛彦飞, 等. 长期有机无机肥配施改变了壤土团聚体及其有机和无机碳分布. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4678—4689.
- [31] Zhang Y, Wang H D, Gao Y H, *et al.* Effects of multivariate flax rotation mode on soil aggregation characteristics and nitrogen content. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(1): 75—88.
张勇, 王海娣, 高玉红, 等. 多元胡麻轮作模式对土壤团聚体特征及氮素含量的影响. 草业学报, 2023, 32(1): 75—88.
- [32] Zhang Q, Yu E J, Lin H B, *et al.* Stability and erodibility of aggregate affected by different continuous green manure cultivations. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(2): 9—16.
张钦, 于恩江, 林海波, 等. 连续种植不同绿肥作物的土壤团聚体稳定性及可蚀性特征. 水土保持研究, 2019, 26(2): 9—16.
- [33] Hu W J, Pang H D, Hu X Y, *et al.* Influence of mulching on soil physical properties and nutrients contents of *Phyllostachys edulis* forest. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2020, 40(5): 20—27.
胡文杰, 庞宏东, 胡兴宜, 等. 覆盖对毛竹林土壤物理性质及养分含量的影响. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(5): 20—27.
- [34] Li H T, Luo J X, Peng D Y, *et al.* Effect of ploughed-back green manures on soil physical properties and its corresponding ecological benefit. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(5): 172—175.
李宏图, 罗建新, 彭德元, 等. 绿肥翻压还土的生态效应及其对土壤主要物理性状的影响. 中国农学通报, 2013, 29(5): 172—175.
- [35] Jing Y P, Zhang J Z, Li X P, *et al.* Study on the effect of planting green manure crops on the improvement of saline-alkali soil in Hetao Irrigation Area. *Journal of Northern Agriculture*, 2019, 47(6): 42—46.
景宇鹏, 张建中, 李秀萍, 等. 种植绿肥作物对河套灌区盐碱土改良效果研究. 北方农业学报, 2019, 47(6): 42—46.
- [36] Duan Z L, Wang C G, Song Y. Effects of different green manure cultivation models on soil physical properties, apple quality and yield in fruit regions of Northern Shaanxi. *China Fruits*, 2022(1): 24—28.
段志龙, 王晨光, 宋云. 陕北苹果园绿肥种植模式对土壤物理性质及果实品质和产量的影响. 中国果树, 2022(1): 24—28.
- [37] Huang Y L, Lei Z S, Zheng T, *et al.* Effects of different nitrogen concentrations on yield and benefit of winter wheat and soil physical and chemical properties. *Crops*, 2020(1): 130—135.
黄寅玲, 雷忠顺, 郑涛, 等. 不同施氮量对冬小麦产量、效益及土壤理化性状的影响. 作物杂志, 2020(1): 130—135.
- [38] Lv G H, Zhao S J, Wang R, *et al.* Effects of consecutive overturning of green manure on soil physical and biological characteristics in tobacco-planting fields. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(4): 905—912.
侣国涵, 赵书军, 王瑞, 等. 连年翻压绿肥对植烟土壤物理及生物性状的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 905—912.
- [39] Nie L P, Guo L W, Zheng C F, *et al.* Planting and incorporation of Chinese milk vetch coupled with chemical fertilizer application: Effects on the physical and chemical characters of paddy soil and rice yield. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(27): 65—69.
聂良鹏, 郭利伟, 郑春风, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤理化性状和水稻产量的影响. 中国农学通报, 2021, 37(27): 65—69.
- [40] Li J, Li Q H, Li P R, *et al.* Effects of long-term organic inputs on distribution of aggregate size and its organic carbon content on Lou soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(6): 1456—1460.
李婕, 黎青慧, 李平儒, 等. 长期有机肥施用、秸秆还田对壤土团聚体及其有机碳含量的影响. 土壤通报, 2012, 43(6): 1456—1460.
- [41] Liu X T, Cao C Y, Zheng C L, *et al.* Effects of long-term straw return on carbon and nitrogen contents of aggregates and crop yield in fluvo-aquic soil. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(4): 25—33.
刘学彤, 曹彩云, 郑春莲, 等. 长期秸秆还田对潮土土壤团聚体碳氮和作物产量的影响. 中国土壤与肥料, 2023(4):

25—33.

- [42] Chen X F, Li Z P, Liu M, *et al.* Effects of different fertilizations on organic carbon and nitrogen contents in water-stable aggregates and microbial biomass content in paddy soil of subtropical China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(5): 950—960.
陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 950—960.
- [43] Han Z X, Fang J J, Wu X P, *et al.* Synergistic effects of organic carbon and nitrogen content in water-stable aggregates as well as microbial biomass on crop yield under long-term straw combined chemical fertilizers application. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(8): 1503—1514.
韩紫璇, 房静静, 武雪萍, 等. 长期秸秆配施化肥下土壤团聚体碳氮分布、微生物量与小麦产量的协同效应. *中国农业科学*, 2023, 56(8): 1503—1514.