

麦豆长期轮作下秸秆还田对土壤 碳氮组分及作物产量的影响

孔德杰^{1,2,3}, 朱金霞¹, 任成杰^{2,3}, 任广鑫^{2,3}, 冯永忠^{2,3}, 杨改河^{2,3}, 刘娜娜⁴

(1. 宁夏农林科学院农业生物技术研究中心, 宁夏 银川 750002; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100;
3. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 4. 宁夏中科精科检测技术有限公司, 宁夏 银川 750011)

摘要:通过在陕西杨凌开展的田间长期定位试验, 研究冬小麦-夏大豆长期轮作模式下秸秆还田量(不还田、半量还田、全量还田)对土壤碳氮养分及麦豆产量的影响。结果表明:土壤全氮、矿物质氮、硝态氮、微生物量氮含量随着秸秆还田量的增加而增加, 与不还田相比, 半量还田处理 0~40 cm 土壤全氮、矿物质氮、硝态氮、微生物量氮含量比不还田处理平均增加 10.51%、11.58%、15.71%、35.68%, 全量还田处理比不还田处理平均增加 19.61%、21.84%、26.50%、40.77%。秸秆半量还田、全量还田处理土壤有机碳含量比不还田处理分别增加 4.10%、14.58%, 水溶性有机碳含量分别增加 2.01%、6.68%, 微生物量碳含量分别增加 6.71%、7.67%。土壤全氮、硝态氮、矿物质氮含量表现为 9—12 月份较高, 3—5 月份较低, 微生物量碳、氮变化趋势与之相反。0~20 cm 土壤中碳、氮各组分含量均高于 20~40 cm 土层。秸秆还田处理增产显著, 与不还田处理相比, 半量还田处理大豆、小麦产量分别增加 3.63%、5.44%, 全量还田处理分别增产 19.69%、10.38%。长期麦豆轮作下秸秆全量还田措施是提高作物产量、改善土壤质量的有效途径。

关键词: 秸秆还田; 麦豆轮作; 土壤; 碳氮组分; 产量

中图分类号: S344.13 **文献标志码:** A

Effects of straw return on soil carbon and nitrogen components and crop yield under long-term wheat-soybean rotation

KONG Dejie^{1,2,3}, ZHU Jinxia¹, REN Chengjie^{2,3}, REN Guangxin^{2,3},
FENG Yongzhong^{2,3}, YANG Gaihe^{2,3}, LIU Nana⁴

(1. Agricultural Biotechnology Research Center, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China;

2. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Shaanxi Engineering Research Center of Circular Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. Ningxia Zhongke Jingke Testing Technology Co., Ltd, Yinchuan, Ningxia 750011, China)

Abstract: Effects on dynamic changes in different fractions of soil nitrogen, soil carbon and crop yield by different treatments of straw retention under long time rotation of winter wheat and summer soybean by field experiment were studied. The straw residue treatments included no straw retention (NS), retention of half straw (HS), and retention of total amount of straw (TS). The result showed that the straw retention enhanced the soil total nitrogen (TN), nitrate (NO_3^- -N), microbial biomass nitrogen (MBN), soil mineral nitrogen (SMN) and soil organic carbon (SOC), dissolved organic carbon (DOC), and microbial biomass carbon (MBC) contents, with significant differences between the different treatments. The average of TN, SMN, NO_3^- -N, MBN contents of 0~40 cm soil under HS treatment was increased 10.51%, 11.58%, 15.71% and 35.68% when compared with that of NS treatment, respectively; and the numbers were increased 19.61%, 21.84%, 26.50%, and 40.77% under TS treatment com-

收稿日期:2021-09-15

修回日期:2022-05-25

基金项目:宁夏回族自治区自然科学基金(2021AAC03278);国家自然科学基金(31971859);陕西省循环农业工程技术研究中心项目(2019HBGC-13);宁夏农林科学院项目(DWX-2018026)

作者简介:孔德杰(1982-),男,河南淮阳人,副研究员,博士,主要从事绿色循环农业技术研发。E-mail: kdj1982@126.com

通信作者:冯永忠(1972-),男,甘肃定西人,教授,博士,主要从事农业区域发展和循环农业研究。E-mail: fengyz@nwsuaf.edu.cn

pared with that of NS treatment, respectively. The content of SOC increased 4.10% and 14.58%, the DOC content increased 2.01% and 6.68%, and MBN increased 6.71% and 7.67% under HS and TS treatments when compared with NS treatment, respectively. The soil TN, SMN and NO_3^- -N contents were higher from September to December and lower from March to May, but the trends of MBC, MBN contents had opposite direction. The contents of carbon and nitrogen components were higher in the surface soil (0~20 cm) than in the subsoil (20~40 cm). Straw retention treatments increased yield of wheat and soybean significantly, and the rate increased 3.63% and 5.44% under HS treatment, and 19.69%, 10.38% under TS treatment as compared with no return treatment. In conclusion, total straw retention under longtime wheat-soybean rotation has maintained soil fertility, reduced fertilizer application, and enhanced the ability of soil carbon sequestration in farmlands as to increase crop yields.

Keywords: straw retention; wheat-soybean rotation; soil; carbon and nitrogen components; yield

我国农作物秸秆年产量约 $7 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$, 秸秆作为一种含有营养物质和能量的重要载体, 处理不当会造成新的污染^[2]。研究长期秸秆还田措施对于增加土壤固碳效应、实现碳中和目标以及藏粮于地、藏粮于技的国家战略具有重要意义。冬小麦与夏大豆轮作种植模式在西北地区已有上千年的历史。大豆是饲料、油脂和植物性蛋白的主要来源, 在农业生产和人体膳食结构中具有重要作用^[3], 豆科植物能通过根瘤菌中固氮微生物将空气中的分子态氮还原成氨供作物吸收利用或贮存在土壤中^[4], 大豆生育期生物固氮量可达 $92 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[5]。土壤中的总氮(TN)、微生物量氮(MBN)、硝态氮(NO_3^- -N)、矿质氮(SMN)在农田土壤氮循环、转化与养分供应、保障作物产量中起到重要作用^[6]。我国大部分地区存在过量施用化肥、有机肥投入不足、土壤质量退化等农业生产现状^[7]。土壤有机碳(SOC)、土壤水溶性有机碳(DOC)、土壤微生物量碳(MBC)是农田土壤碳库重要组成部分, 为土壤微生物提供了重要的食物和能量来源, 在土壤肥力和土壤固碳方面起到重要作用^[8]。农田土壤碳氮组成、含量变化可以影响到作

物产量、环境质量、人类健康^[9]。对于秸秆还田的相关研究一直是国内外研究的热点问题^[10-11], 在长期麦豆轮作过程中, 土壤碳氮组分含量动态变化以及对长期秸秆还田的响应关系尚缺乏足够的研究报道。因此, 本研究以秸秆不还田、半量还田和全量还田作为处理, 研究麦豆长期轮作对土壤碳氮养分变化以及作物产量的影响, 可为提高大豆种植效益、扩大种植面积以及改善土壤质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西关中平原西部杨凌区西北农林科技大学北校区科研基地($108^\circ 7' \text{E}, 34^\circ 12' \text{N}$), 试验地海拔高度 520 m, 年平均气温 12.9°C , 年平均降水量为 660 mm, 主要集中在 7—9 月, 全年日照时数 2 163.5 h, 无霜期 211 d, 为暖温带季风区气候, 一年两熟。试验为冬小麦—夏大豆轮作模式下秸秆不同还田处理的长期定位试验, 开始于 2010 年 9 月, 试验地土壤为壤土, 不种植其他作物。本研究所用数据为 2016 年 4 月—2018 年 6 月, 研究期间具体月均气温和降雨量见图 1。

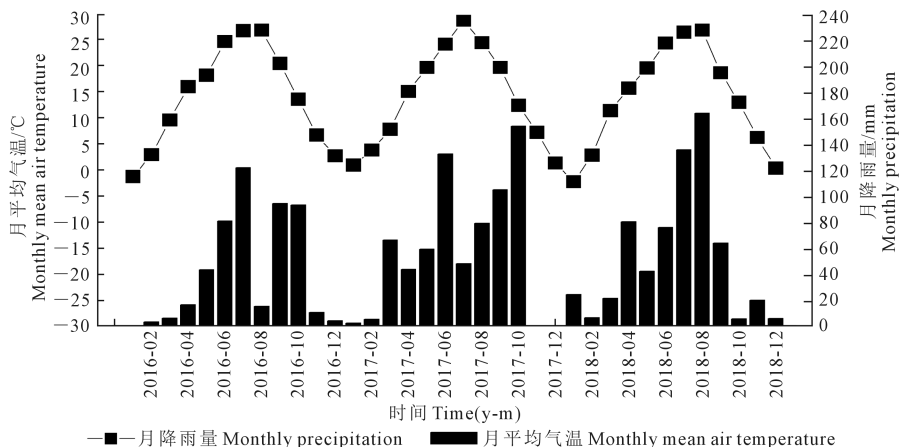


图1 试验期月平均气温和月降雨量变化

Fig.1 Change of monthly mean air temperature and monthly precipitation during test period

1.2 试验设计及试验材料

设置 3 种秸秆还田量,分别为:秸秆不还田(NS)、秸秆半量还田(HS)、秸秆全量还田(TS),重复 3 次,共 9 个小区,随机分布,小区面积 68 m²。秸秆中养分含量及秸秆还田量见表 1。秸秆不还田:小麦、大豆作物收获后,人工拔除作物秸秆及根系,并捡拾小区内凋落物和残茬。秸秆半量还田:冬小麦和夏大豆用收割机收获后,人工隔行拔除小区 50%的秸秆,剩余秸秆施用方式同秸秆全量还田处理。秸秆全量还田:冬小麦收割机收获后秸秆均匀覆盖在小区表面;夏大豆收获后,全部大豆秸秆用粉碎机粉碎,均匀撒入小区表面旋耕后播种冬小麦,旋耕深度 15 cm 左右。小麦 6 月份收获后种植夏大豆,小麦秸秆覆盖在土壤表面,夏大豆 9 月底收获,大豆秸秆打碎旋耕后种植小麦。试验供试冬小麦品种为西农 889,夏大豆品种为东豆 339。播种方式为机械条播,小麦行距 20 cm,夏大豆行距 60 cm。各小区化肥统一施用量为全氮 135 kg · hm⁻², P₂O₅ 118 kg · hm⁻²。小麦、大豆生育期均不灌水,其他田间管理措施同当地常规栽培。

表 1 秸秆中碳、氮含量及秸秆还田量
Table 1 TC、TN content in straw and the straw retention amount of each treatment

作物种类 Crop type	秸秆中碳、氮含量 TC、TN content of straw/%		各处理秸秆还田量 Straw retention amount of each treatment/(kg · hm ⁻²)		
	TC	TN	NS	HS	TS
冬小麦 Winter wheat	44.4	0.66	0	1900 大豆秸秆	3800 大豆秸秆
				Soybean straw	Soybean straw
夏大豆 Summer soybean	45.35	1.05	0	3200 小麦秸秆	6400 小麦秸秆
				Wheat stalk	Wheat stalk

1.3 检测指标及方法

在小麦(苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期)、大豆(籽粒膨大期)生长关键时期及种植前、收获后进行取样,在每试验小区对角线位置用土钻多点取样,同一土层土样混合过筛,取样深度分别为 0~20 cm 和 20~40 cm,土壤中全氮含量采用 H₂SO₄-连续流动分析仪测定。土壤鲜样过筛经 KCl 溶液浸提过滤、氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提,用连续流动分析仪分别测定土壤中硝态氮、微生物量氮含量。土壤中有机碳含量采用 K₂CrO₇-H₂SO₄法测得;水溶性有机碳用 0.5 mol · L⁻¹的 K₂SO₄溶液浸提,TOC 分析仪(日本岛津)测定;微生物量碳采用氯仿熏蒸-K₂SO₄溶液浸提-TOC 分析仪测定^[12]。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2013 软件对原始数据进行收集整理。用 Spss 21 进行方差分析,用 Origin 9.0 进行图

片制作,用 R 语言进行产量和土壤碳、氮指标的相关性分析和作图。

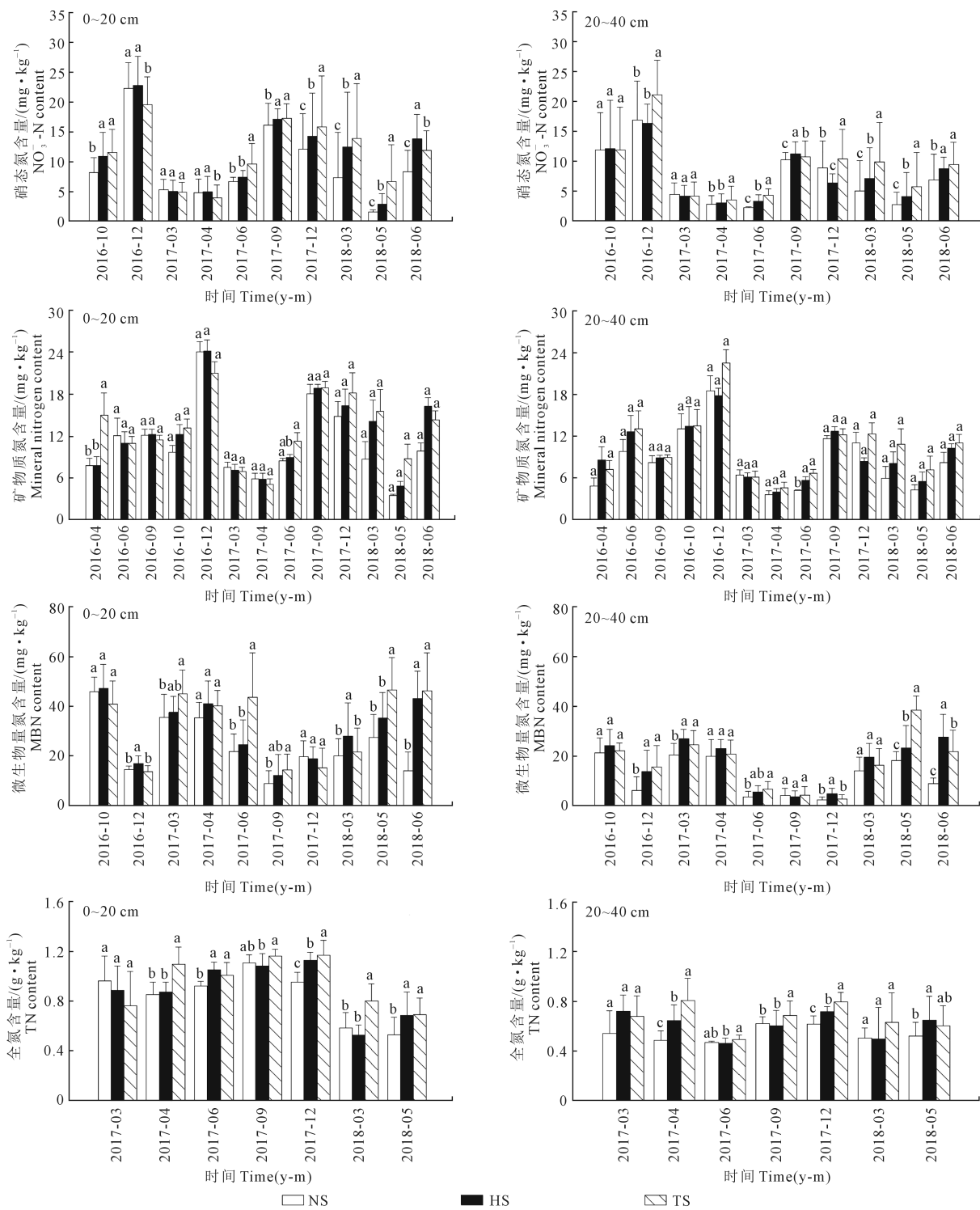
2 结果与分析

2.1 秸秆还田量对麦豆长期轮作土壤氮素含量的影响

麦豆长期轮作模式下秸秆还田对不同时期土壤全氮、硝态氮、矿质氮、微生物量氮含量有明显促进作用(图 2),不同秸秆还田处理间有显著性差异,秸秆全量还田处理土壤氮素含量总体上高于半量还田处理,并且土壤中硝态氮、微生物量氮含量变化受秸秆还田量的影响差异较为明显。麦豆轮作种植模式下土壤中氮素含量存在着有规律的动态变化,受小麦播种施用基肥和大豆固氮、秸秆腐解等因素影响,在每年的 9—12 月份土壤中硝态氮、矿质氮含量出现峰值。3—5 月份随温度上升小麦生长旺盛,对土壤中养分消耗增加,在小麦抽穗灌浆期土壤硝态氮、矿质氮含量出现低谷。土壤中微生物量氮含量受温度影响较大,变化趋势与硝态氮、矿物质含量相反,表现为每年的 9—12 月份含量低,3—6 月份含量高的特点。土壤中全氮含量特别是 20~40 cm 土层中的含量年季间变化较小。

图 2 表明:受秸秆还田、施肥及耕作等因素影响,同一时期农田 0~20 cm 土壤全氮、硝态氮、矿物质氮、微生物量氮含量高于 20~40 cm 土壤养分含量,随剖面深度逐渐降低。层化比(Stratification ratio, SR)是在相同土壤条件下,表层土壤养分含量与下层含量的比率,该比率大小受土壤养分吸收运移、采样层深度等因素影响较大。本研究层化比按照 0~20 cm 土层土壤养分与 20~40 cm 土层养分比值进行计算,结果表明:NS、HS、TS 处理土壤微生物量氮含量层化比平均值分别为 2.94、2.27、2.68,全氮含量层化比平均值分别为 1.60、1.51、1.47,随着秸秆还田量增加,微生物量氮含量层化比有先减少后增加趋势,而全氮含量层化比呈减少趋势。

从图 3 可以看出:秸秆还田措施增加了土壤中硝态氮、矿物质氮、微生物量氮、全氮含量,不同还田量、不同土壤深度增加比例不同。HS 处理 0~20 cm 土壤全氮、矿物质氮、硝态氮、微生物量氮平均含量比 NS 处理增加比例分别为 7.33%、12.13%、16.86%、25.02%,TS 处理比 NS 处理增加比例分别为 14.52%、19.79%、24.46%、34.56%。20~40 cm 土壤 HS 处理全氮、矿物质氮、硝态氮、微生物量氮平均含量比 NS 处理增加比例分别 13.69%、11.02%、14.55%、46.34%,TS 处理比 NS 处理增加比例分别



注:小写字母表示秸秆不同还田量间同一时期差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among straw retention treatments under the same time at $P < 0.05$ level, the same as below.

图 2 秸秆还田量对土壤不同形态氮素含量的影响

Fig.2 Effects on soil nitrogen fractions under different straw application level

为24.70%、23.90%、28.54%、46.98%。秸秆还田处理0~40 cm 土壤全氮、矿物质氮、硝态氮、微生物量氮含量比不还田处理平均增加 15.06%、16.71%、21.10%、38.23%。NS、HS、TS 处理土壤硝态氮含量占土壤总氮含量的比例平均分别为 0.98%、1.09%、

1.08%,土壤矿质氮含量占总氮含量的比例平均分别为 1.15%、1.18%、1.25%,土壤微生物量氮含量占总氮含量的比例平均分别为 2.28%、2.71%、2.75%,土壤硝态氮占土壤总氮比例、矿质氮含量占总氮的比例、微生物量氮占总氮的比例随着秸秆还田量的增加而增加。

2.2 秸秆还田量对麦豆长期轮作土壤碳组分含量的影响

微生物量碳、水溶性有机碳、有机碳含量是反映土壤有机质含量和肥力状况的重要指标。秸秆还田显著促进了土壤有机碳含量提升, 全量还田处

理下土壤微生物量碳、土壤水溶性有机碳、土壤有机碳平均含量最高(图 4)。从图 4 可以看出土壤中微生物量碳含量在不同时期变化较大, 其中在每年的秋冬季 9—12 月含量逐渐降低, 在 3—5 月小麦生长旺盛时较高, 在 6 月小麦收获后微生物量碳有所

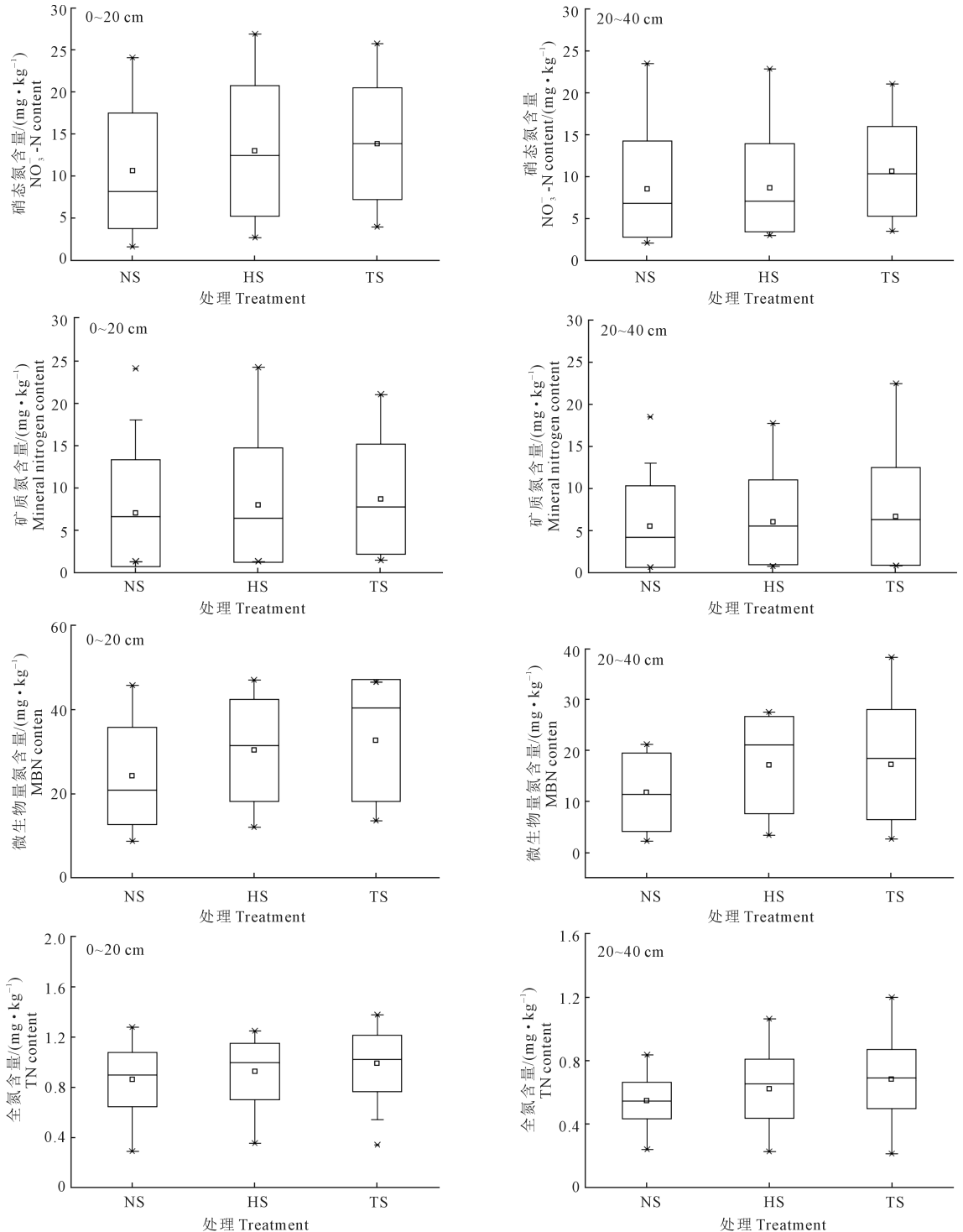


图 3 秸秆还田量对土壤不同氮组分平均含量的影响

Fig.3 Effects on mean content of different nitrogen components in soil under different straw application level

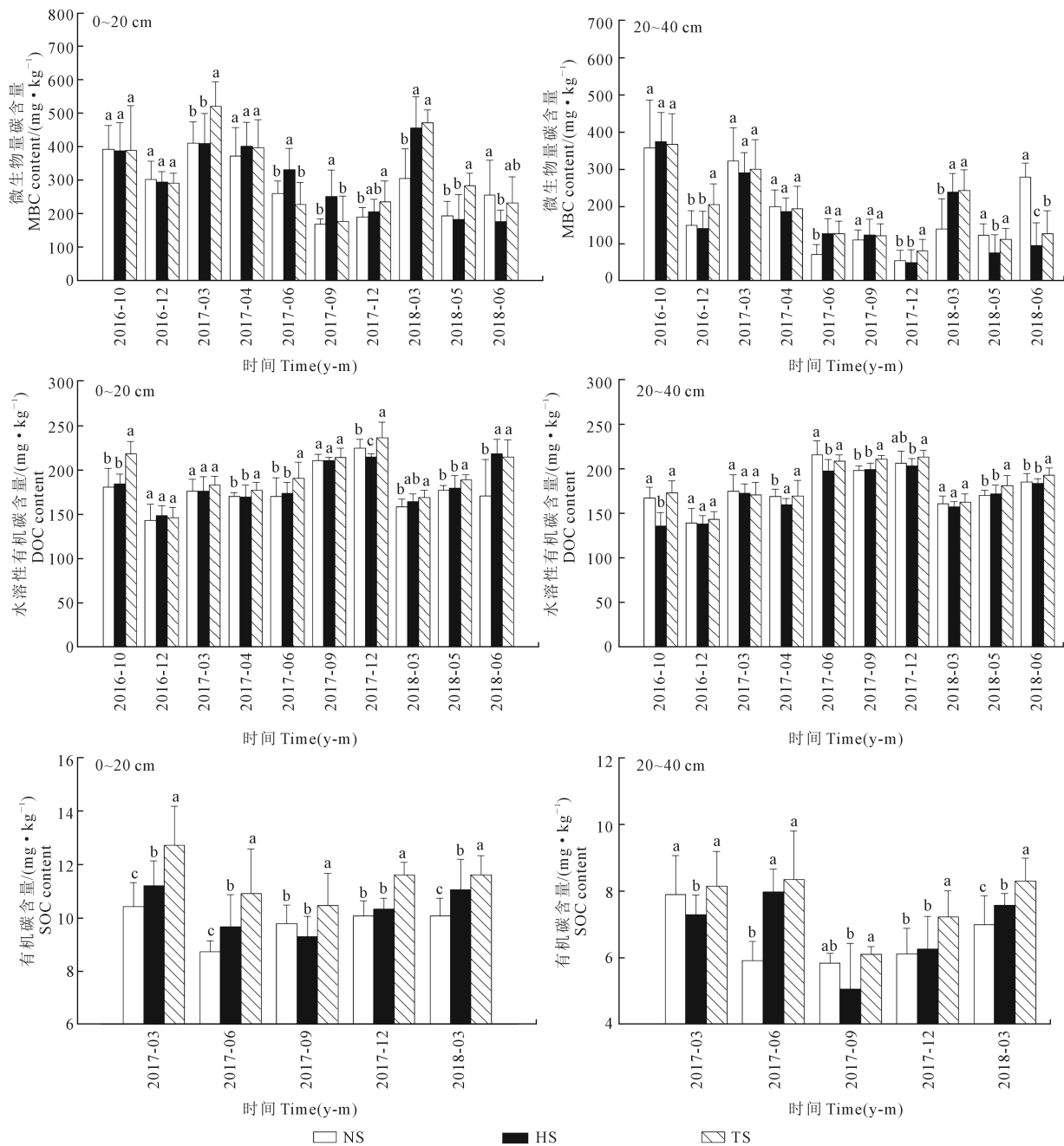


图4 秸秆还田量对土壤碳组分含量的影响

Fig.4 Effects on soil carbon content under different straw application level

降低。不同秸秆还田处理下0~20 cm土壤微生物量碳含量差异性较大,20~40 cm土壤的变化差异性较小,并且不同时期土壤微生物量碳含量变异系数大于土壤水溶性有机碳和有机碳含量的变异系数,表明秸秆还田量和温度变化是影响土壤中微生物量碳含量的重要因素。

随着秸秆还田量的增加土壤中微生物量碳、水溶性有机碳、有机碳含量逐渐增加,TS处理下各种碳组分含量的变异系数大于NS处理,并且同一秸秆还田量对0~20 cm土壤碳素含量增幅大于20~40 cm土壤(图4、图5)。在0~20 cm和20~40 cm

土壤中,土壤微生物量碳含量HS处理比NS处理分别增加10.45%和2.96%,TS处理比NS处理分别增加14.13%和2.98%;土壤水溶性有机碳含量HS处理比NS处理分别增加3.28%和0.73%,TS处理比NS处理分别增加8.76%和4.60%;土壤有机碳含量HS处理比NS处理分别增加4.41%和3.78%,TS处理比NS处理分别增加14.15%和15.00%。秸秆还田处理0~40 cm土壤微生物量碳、水溶性有机碳、有机碳平均含量比不还田处理分别增加7.63%、4.34%、9.34%。从表1可以算出:HS处理每年投入的秸秆碳、氮含量平均为2 282.5 kg·hm⁻²和41.1

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, TS 处理每年投入 $4\ 564.9\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $82.14\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 加上施入化肥, HS 和 TS 处理投入 C/N 比分别为 12.96、21.02。结果显示: NS、HS、TS 处理下土壤微生物熵 (MBC/SOC) 的平均值分别为 2.72%、2.79%、2.58%, 水溶性有机碳占有有机碳的比例 (DOC/SOC) 平均值分别为 2.11%、2.06%、1.96%,

表明 MBC/SOC、DOC/SOC 随秸秆还田量增加有减少趋势。NS、HS、TS 处理下土壤碳氮比 (TC/TN) 平均分别为 11.10、12.25、13.02, 微生物量碳氮比 (MBC/MBN) 平均分别为 13.49、10.04、9.79, 表明 TC/TN 随秸秆还田量增加而增加, 而 MBC/MBN 随秸秆还田量增加而减少。

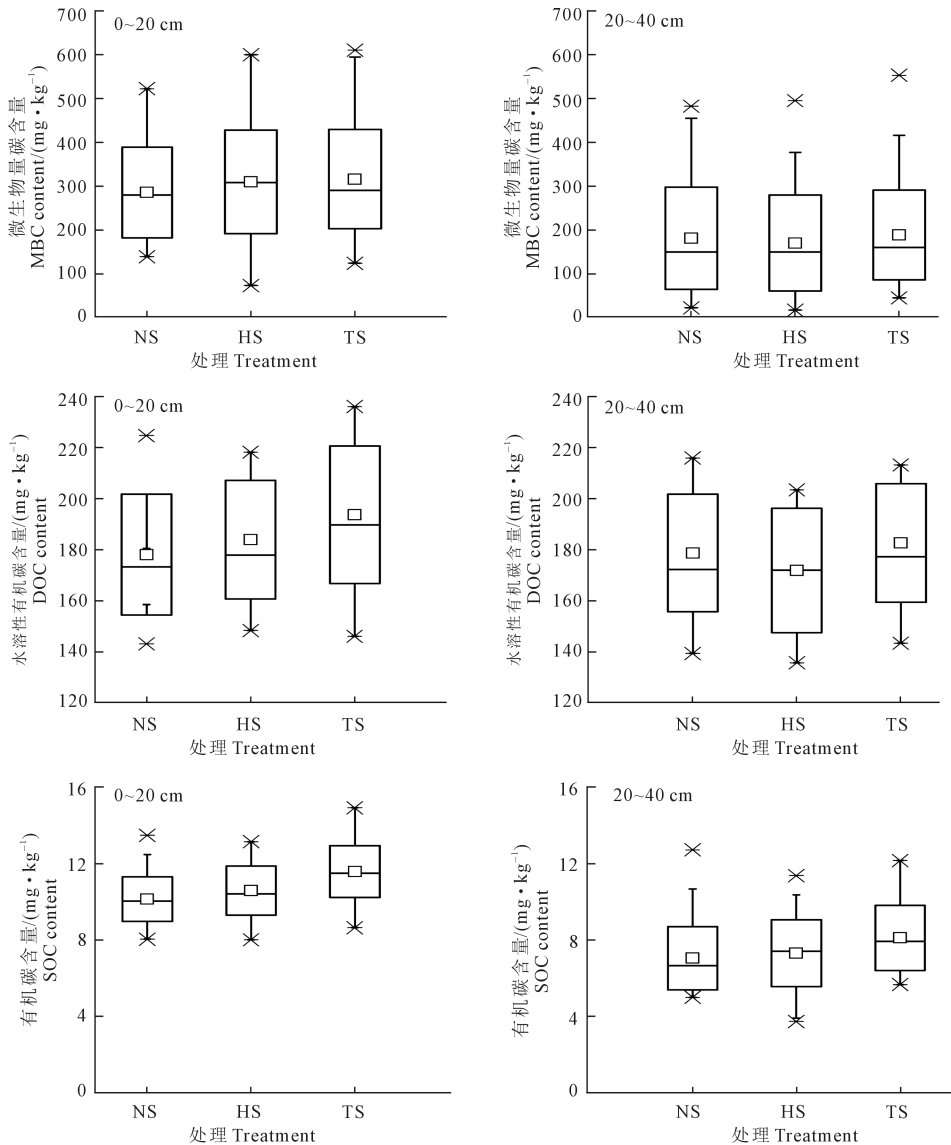


图 5 秸秆还田量对土壤不同碳组分平均含量的影响

Fig.5 Effects on mean content of different carbon components in soil under different straw application level

2.3 秸秆还田量对麦、豆产量的影响及其相关性分析

秸秆还田对小麦、大豆产量有显著的促进作用 (图 6), 2016 年、2017 年、2018 年度 HS 处理大豆产量较 NS 处理增产幅度分别为 2.42%、7.55%、0.12%, 平均增产 3.63%, TS 处理较 NS 处理增产幅度分别为 16.43%、24.26%、18.39%, 平均增产 19.69%。2016 年、2017 年、2018 年度秸秆 HS 处理小麦产量

较 NS 处理增产幅度分别为 7.86%、5.07%、3.38%, 平均增产 5.44%, TS 处理小麦产量较 NS 处理增产幅度分别为 10.10%、13.13%、7.91%, 平均增产 10.38%。秸秆还田对小麦、大豆的平均增产幅度分别为 7.91%、11.53%。

作物总产与小麦产量、大豆产量有显著的正相关关系, 与土壤总氮含量、硝态氮含量有极显著的正相关关系, 相关系数分别为 0.86 和 0.84 (表 2)。

大豆产量与土壤总氮、硝态氮含量有极显著的正相关关系,相关系数分别为 0.94、0.85,与土壤有机碳、水溶性有机碳、微生物量碳呈显著正相关关系。小麦产量与土壤中总氮含量呈极显著正相关,相关系数 0.85,与土壤中硝态氮含量、微生物量碳含量呈显

著性正相关,相关系数分别为 0.82、0.72,与土壤有机碳、水溶性有机碳呈正相关关系。土壤中硝态氮与土壤全氮含量呈显著正相关,相关系数为 0.79,与微生物量氮含量呈负相关关系,相关性系数为-0.21。

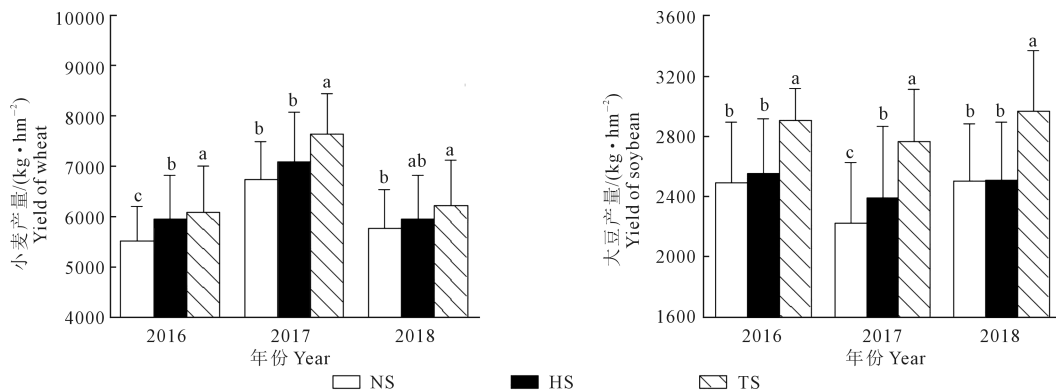


图 6 秸秆还田对小麦、大豆产量的影响

Fig.6 Effects on yield of soybean and wheat by straw retention application

表 2 土壤碳、氮组分与小麦、大豆产量相关性分析

Table 2 Correlation analysis of soil nitrogen and carbon components with wheat and soybean yields

项目 Item	总产 Total yield	大豆产量 Soybean yield	小麦产量 Wheat yield	水溶性 有机碳 DOC	有机碳 SOC	微生物 量碳 MBC	总氮 TN	微生物 量氮 MBN	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N
总产 Total yield	1.00								
大豆产量 Soybean yield	0.97**	1.00							
小麦产量 Wheat yield	0.96**	0.94**	1.00						
水溶性有机碳 DOC	0.71*	0.80*	0.66	1.00					
有机碳 SOC	0.75*	0.86**	0.69	0.99**	1.00				
微生物量碳 MBC	0.76*	0.83*	0.72*	0.89**	0.92**	1.00			
总氮 TN	0.86**	0.94**	0.85**	0.92**	0.94**	0.82*	1.00		
微生物量氮 MBN	0.06	0.06	0.05	0.49	0.40	0.44	0.22	1.00	
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	0.84**	0.85**	0.82*	0.61	0.67	0.68	0.79*	-0.21	1.00

注: **表示 $P < 0.01$ 极显著性水平; *表示 $P < 0.05$ 显著水平。

Note: **, correlation is significant at the $P < 0.01$ level; *, correlation is significant at the $P < 0.05$ level, respectively.

3 讨论

3.1 麦豆长期轮作下秸秆还田对土壤氮组分动态变化的影响

麦豆长期轮作种植模式下秸秆还田量对土壤中的氮素含量有显著影响,土壤全氮、微生物量氮层化比作为土壤演替方向的评价指标,一般情况下其值越高表明土壤质量越好^[13]。秸秆还田后激发土壤微生物活性,增加了对土壤中氮的固持^[14],导致全氮含量层化比随着秸秆还田量的增加而逐渐减少,师江澜等^[15]的研究结论与此相符。蔡丽君等^[16]的研究表明秸秆还田使土壤全氮增加 2.2%~20.0%,本研究表明秸秆还田处理下土壤全氮含量较不还田处理增加 8.79%~25.00% (图 2)。秸秆还

田增加微生物养分能量来源和土壤有机质积累^[17-18],土壤中微生物量氮含量与秸秆还田有显著相关性^[18],本研究显示微生物量氮层化比都高于 2,又在 2 附近,说明麦豆轮作种植模式下连续 9 a 的秸秆还田措施改善了土壤理化状况。土壤中硝态氮、矿质氮含量及所占比例能反映土壤氮素形态及供肥水平,本研究表明土壤中硝态氮、矿质氮含量峰值发生在秋冬季,低谷出现在小麦拔节-灌浆时期。土壤硝态氮含量及其占土壤总氮的比例随着秸秆还田量的增加而增加,原因可能是大豆秸秆中氮素含量高,腐解过程促进微生物对有机氮素矿化而造成的,合理的秸秆还田可提高土壤中有机氮的矿化速率^[19]。

土壤微生物量氮在调控土壤氮素供应、提高氮

肥利用效率等方面发挥了重要作用,受多种因素影响,其含量占土壤全氮的 2%~7%^[20],本研究表明土壤微生物量氮含量占总氮含量的比例平均为 2.58%,并随秸秆还田量的增加而增加。已有研究表明秸秆还田措施下土壤微生物量氮比对照高 12.1%~60.2%^[21],本研究结果显示 HS、TS 处理微生物量氮含量较 NS 处理分别增加 25.02% 和 34.56%。整合分析表明施用有机肥比不施肥、单施化肥土壤微生物量氮分别提高为 70.2% 和 34.2%^[22],高于本研究的增加幅度。但由于秸秆还田对土壤微生物的激发效应,造成土壤微生物和作物之间的矿质氮竞争^[23],而 Zhang 等^[24]的研究表明大豆秸秆还田后分解矿化速率快于土壤生物固持作用,向土壤释放氮素,表明大豆秸秆更适宜直接还田。

3.2 麦豆长期轮作下秸秆还田对土壤有机碳含量的影响

施用有机肥、秸秆还田是提升土壤有机碳密度的有效措施^[25],秸秆还田措施下土壤有机碳含量可提升 8.9%~28.1%^[18],杨晨璐等^[26]研究表明秸秆还田处理下土壤有机碳含量增加比例为 6%~14%,本研究表明麦豆长期轮作下秸秆还田处理有机碳含量比不还田处理平均高出 9.31%,与两者研究结果相符。土壤有机碳、TC/TN 比值随着秸秆还田量的增加而增加,MBC/SOC、DOC/SOC、MBC/MBN 随着秸秆还田量的增加而减少,说明合理的秸秆还田可以显著提高土壤有机碳储量,提高土壤固碳减排能力,过量秸秆还田促进土壤微生物繁殖,增加对矿质氮的固定,导致 MBC/SOC 和 MBC/MBN 比值随着秸秆还田量的增加而减少。而长期施用化肥且不施用有机肥会导致土壤碳氮比下降,土壤有机碳分解,土壤质地变差^[27]。

土壤中水溶性有机碳、微生物量碳是影响作物生长发育的关键因素^[28]。种植豆科作物并结合大豆秸秆还田可明显增加土壤中水溶性有机碳含量^[29]。本研究表明麦豆长期轮作种植模式下秸秆还田使土壤水溶性有机碳含量平均增加 4.34%。整合分析研究表明:秸秆还田、秸秆还田与化肥配施、厩肥、厩肥与化肥配施、平衡施肥、不平衡施肥的土壤微生物量碳平均值依次是 515、464、421、385、331、274 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[30],白桦、山杨和蒙古栎森林土壤微生物量碳平均含量分别为 331.37、418.52 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 529.34 $\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[31],作物秸秆还田措施下,旋耕耕作条件下微生物量碳含量比免耕增加 33.87%~39.33%^[32],以上微生物量碳含量及增幅高于本试验检测结果,可能是不同区域的降雨、土壤

类型以及归还土壤有机物不同造成的。

3.3 秸秆还田对小麦、大豆产量的影响

麦豆长期轮作种植模式下连续秸秆还田处理可增加土壤的供氮能力,激发土壤微生物活性,提高土壤供肥能力和作物产量,武际等^[33]的研究报道与此相符。但很多研究者对秸秆还田是否有益作物增产意见不一致,有研究认为秸秆还田后短时间不能腐解,导致土壤“跑气漏风”,造成土壤水分不足^[34],不利于下季作物的出苗、成苗,并且病、虫、草害发生几率加大,大量秸秆腐解时微生物对土壤中矿质氮固持增大,进而引起作物产量降低的负面效应^[35]。秸秆还田时配施氮肥协调土壤碳氮比,提高秸秆腐解率、作物产量及氮肥利用率^[36],等氮条件下秸秆替代化肥的比例应控制在 50% 以下^[37],蔡丽君等^[16]研究表明豆玉轮作种植模式下 60% 玉米秸秆还田量较不还田处理大豆产量增产 7.3%。因此合理运筹秸秆还田和优化施肥能保证土壤中氮素供应、减少损失又能满足作物的生长发育^[38]。

4 结 论

作物秸秆可作为土壤氮、碳重要来源之一,小麦-大豆长期轮作种植模式下,由于豆科作物的固氮作用和秸秆还田后养分矿化,增加了土壤碳氮养分含量。与不还田相比,秸秆半量、全量还田处理土壤全氮含量分别增加 10.51%、19.61%,矿物质氮含量分别增加 11.58%、21.84%,硝态氮含量分别增加 15.71%、26.50%,微生物量氮含量分别增加 35.68%、40.77%。秸秆半量、全量还田处理土壤有机碳比不还田处理分别增加 4.10%、14.58%,水溶性有机碳分别增加 2.01%、6.68%,微生物量碳含量分别增加 6.71%、7.67%。不同秸秆还田处理间差异显著($P < 0.05$)。秸秆还田提高了农田耕地质量和作物产量,土壤中硝态氮、全氮与作物产量呈极显著正相关关系($P < 0.01$)。

参 考 文 献:

- [1] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,等.中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):1-21.
SONG D L, HOU S P, WANG X B, et al. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 1-21.
- [2] LU F. How can straw incorporation management impact on soil carbon storage? A meta-analysis[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2015, 20(8): 1545-1568.
- [3] 何艳,黄晓伟,程中一,等.新形势下大豆产地土壤环境保护与功能提升的研发建议[J].土壤学报,2021,58(2):269-280.
HE Y, HUANG X W, CHENG Z Y, et al. Proposals for research on

- protection and functional improvement of soil environment in soybean producing area in face of the new situation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 269-280.
- [4] 李欣欣,许锐能,廖红.大豆共生固氮在农业减肥增效中的贡献及应用潜力[J].*大豆科学*,2016,35(4):531-535.
LI X X, XU R N, LIAO H. Contributions of symbiotic nitrogen fixation in soybean to reducing fertilization while increasing efficiency in agriculture[J]. *Soybean Science*, 2016, 35(4): 531-535.
- [5] 关大伟,李力,岳现录,等.我国大豆的生物固氮潜力研究[J].*植物营养与肥料学报*,2014,20(6):1497-1504.
GUAN D W, LI L, YUE X L, et al. Study on potential of biological nitrogen fixation of soybean in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(6): 1497-1504.
- [6] MIAO Y X, STEWART B A, ZHANG F S. Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(2): 397-414.
- [7] 王小英,陈占飞,胡凡,等.陕西省农田化肥投入过量与不足的研究[J].*干旱地区农业研究*,2017,35(6):159-165.
WANG X Y, CHEN Z F, HU F, et al. Study on the excessive and insufficient of chemical fertilizer inputs on farmland in Shaanxi Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(6): 159-165.
- [8] 李亚林,张旭博,任凤玲,等.长期施肥对中国农田土壤溶解性有机碳氮含量影响的整合分析[J].*中国农业科学*,2020,53(6):1224-1233.
LI Y L, ZHANG X B, REN F L, et al. A meta-analysis of long-term fertilization impact on soil dissolved organic carbon and nitrogen across Chinese cropland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(6): 1224-1233.
- [9] GU B J, CHEN D L, YANG Y, et al. Soil-food-environment-health nexus for sustainable development[J]. *Research*, 2021, 2021: 9804807.
- [10] ZHANG J W, LI W W, ZHOU Y, et al. Long-term straw incorporation increases rice yield stability under high fertilization level conditions in the rice-wheat system[J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(5): 1191-1197.
- [11] ZHAO X, LIU B Y, LIU S L, et al. Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: a meta-analysis [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(6): 694-709.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:25-69.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-69.
- [13] 石彦琴,高旺盛,陈源泉,等.耕层厚度对华北高产灌溉农田土壤有机碳储量的影响[J].*农业工程学报*,2010,26(11):85-90.
SHI Y Q, GAO W S, CHEN Y Q, et al. Effect of topsoil thickness on soil organic carbon in high-yield and irrigated farmland in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11): 85-90.
- [14] 李红宇,王志君,范名宇,等.秸秆连续还田对苏打盐碱水稻土养分及真菌群落的影响[J].*干旱地区农业研究*,2021,39(2):15-23.
LI H Y, WANG Z J, FAN M Y, et al. Effects of continuous straw returning on nutrients of soda saline-alkaline paddy soil and fungal community[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(2): 15-23.
- [15] 师江澜,李秀双,王淑娟,等.长期浅耕与秸秆还田对关中平原冬小麦-夏玉米轮作土壤钾素含量及层化比率的影响[J].*应用生态学报*,2015,26(11):3322-3328.
SHI J L, LI X S, WANG S J, et al. Effect of long-term shallow tillage and straw returning on soil potassium content and stratification ratio in winter wheat/summer maize rotation system in Guanzhong Plain, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3322-3328.
- [16] 蔡丽君,张敬涛,刘婧琦,等.玉米-大豆免耕轮作体系玉米秸秆还田量对土壤养分和大豆产量的影响[J].*作物杂志*,2015,(5):107-110.
CAI L J, ZHANG J T, LIU J Q, et al. Effects of corn stalk amount returning to field on the soil nutrient and soybean yields under alternate-year no-till corn-soybean rotation[J]. *Crops*, 2015, (5):107-110.
- [17] 李玉鹏,贾志宽,韩清芳,等.秸秆覆盖量对旱作小麦耗水特性及土壤性质的影响[J].*干旱地区农业研究*,2017,35(4):217-222,229.
LI Y P, JIA Z K, HAN Q F, et al. Effects of mulching straw at different rates on water use pattern and soil properties of dry-land wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(4): 217-222, 229.
- [18] 王少昆,赵学勇,左小安,等.科尔沁沙质草甸土壤微生物数量的垂直分布及季节动态[J].*干旱区地理*,2009,32(4):610-615.
WANG S K, ZHAO X Y, ZUO X A, et al. Vertical distribution and seasonal dynamics of soil microbial number in sandy grassland of Horqin[J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(4): 610-615.
- [19] 李晓,李亚鑫,张娟霞,等.玉米秸秆还田对冬小麦产量和不同生育期土壤硝态氮累积量的影响[J].*干旱地区农业研究*,2016,34(6):156-162.
LI X, LI Y X, ZHANG J X, et al. Effects of maize straw return on yield and soil nitrate accumulation in different growth stages of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(6): 156-162.
- [20] 仇少君,彭佩钦,刘强,等.土壤微生物生物量氮及其在氮素循环中作用[J].*生态学杂志*,2006,25(4):443-448.
QIU S J, PENG P Q, LIU Q, et al. Soil microbial biomass nitrogen and its role in nitrogen cycling[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(4): 443-448.
- [21] 刘定辉,舒丽,陈强,等.秸秆还田少免耕对冲积土微生物多样性及微生物碳氮的影响[J].*应用与环境生物学报*,2011,17(2):158-161.
LIU D H, SHU L, CHEN Q, et al. Effects of straw mulching and little- or zero-tillage on microbial diversity and biomass C and N of alluvial soil in Chengdu Plain, China[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2011, 17(2): 158-161.
- [22] 任凤玲,张旭博,孙楠,等.施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J].*中国农业科学*,2018,51(1):119-128.
REN F L, ZHANG X B, SUN N, et al. A meta-analysis of manure application impact on soil microbial biomass across China's croplands [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(1): 119-128.
- [23] HENRIKSEN T M, BRELAND T A. Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activ-

- ities during decomposition of wheat straw in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(8): 1121-1134.
- [24] ZHANG H, XU W X, LI Y B, et al. Changes of soil microbial communities during decomposition of straw residues under different land uses[J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(5): 666-677.
- [25] 赵惠丽,董金璠,师江澜,等.秸秆还田模式对小麦-玉米轮作体系土壤有机碳固存的影响[J].*土壤学报*,2021,58(1):213-224.
- ZHAO H L, DONG J J, SHI J L, et al. Effect of straw returning mode on soil organic carbon sequestration [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 213-224.
- [26] 杨晨璐,刘兰清,王维钰,等.麦玉复种体系下秸秆还田与施氮对作物水氮利用及产量的效应研究[J].*中国农业科学*,2018,51(9): 1664-1680.
- YANG C L, LIU L Q, WANG W Y, et al. Effects of the application of straw returning and nitrogen fertilizer on crop yields, water and nitrogen utilization under wheat-maize multiple cropping system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(9): 1664-1680.
- [27] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [28] 苏冬雪,王文杰,邱岭,等.落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系[J].*生态学报*,2012,32(21):6705-6714.
- SU D X, WANG W J, QIU L, et al. Temporal and spatial variations of DOC, DON and their function group characteristics in larch plantations and possible relations with other physical-chemical properties [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6705-6714.
- [29] 胡晓珊,唐树梅,曹卫东,等.温室夏闲季种植翻压绿肥对土壤可溶性有机碳氮及无机氮的影响[J].*中国土壤与肥料*,2015,(3): 21-28.
- HU X S, TANG S M, CAO W D, et al. Effects of plantation and utilization of green manures during the summer fallow season on soil dissolved organic carbon and nitrogen, and inorganic nitrogen in greenhouse[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2015,(3): 21-28.
- [30] 王晓娟,何海军,连晓荣,等.整合分析不同施肥运筹下中国农田土壤微生物量的变化特征[J].*土壤与作物*,2019,8(2):119-128.
- WANG X J, HE H J, LIAN X R, et al. A meta-analysis approach to assess the effects of fertilizations on soil microbial biomass in China's farmlands[J]. *Soils and Crops*, 2019, 8(2): 119-128.
- [31] 立天宇,康峰峰,韩海荣,等.冀北辽河源自然保护区土壤微生物碳代谢对阔叶林叶凋落物组成的响应[J].*应用生态学报*,2015,26(3):715-722.
- LI T Y, KANG F F, HAN H R, et al. Responses of soil microbial carbon metabolism to the leaf litter composition in Liaohe River Nature Reserve of northern Hebei Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 715-722.
- [32] 陈尚洪,刘定辉,朱钟麟,等.四川盆地秸秆还田免耕对土壤养分及碳库的影响[J].*中国水土保持科学*,2008,6(S1):54-56,66.
- CHEN S H, LIU D H, ZHU Z L, et al. Effects of straw-mulching and no-tillage on soil nutrients and carbon pool in Sichuan Basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(S1): 54-56, 66.
- [33] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等.连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响[J].*中国农业科学*,2012,45(9):1741-1749.
- WU J, GUO X S, LU J W, et al. Effects of continuous straw mulching on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and crop yields [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(9): 1741-1749.
- [34] 李少昆,王克如,冯聚凯,等.玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J].*作物学报*,2006,32(3):463-465,478.
- LI S K, WANG K R, FENG J K, et al. Factors affecting seedling emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 463-465, 478.
- [35] 王维钰,乔博,AKHTAR K,等.免耕条件下秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统土壤呼吸及土壤水热状况的影响[J].*中国农业科学*,2016,49(11):2136-2152.
- WANG W Y, QIAO B, AKHTAR K, et al. Effects of straw returning to field on soil respiration and soil water heat in winter wheat-summer maize rotation system under no tillage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(11): 2136-2152.
- [36] 梁斌,赵伟,杨学云,等.氮肥及其与秸秆配施在不同肥力土壤的固持及供应[J].*中国农业科学*,2012,45(9):1750-1757.
- LIANG B, ZHAO W, YANG X Y, et al. Nitrogen retention and supply after addition of N fertilizer and its combination with straw in the soils with different fertilities [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(9): 1750-1757.
- [37] 吕得林,张默黔,周春晓,等.腐熟秸秆还田替代部分化肥对冬小麦生长、产量和氮素利用的影响[J].*安徽农业大学学报*,2019,46(1):117-123.
- LV D L, ZHANG M H, ZHOU C X, et al. Effects of rotten straw substituting part of mineral fertilizer on growth, grain yield and nitrogen utilization of winter wheat [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2019, 46(1): 117-123.
- [38] YE J, PEREZ P G, ZHANG R, et al. Effects of different C/N ratios on bacterial compositions and processes in an organically managed soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(1): 137-147.