

DOI: 10.5846/stxb202104060882

刘旭,李庭宇,安婷婷,徐英德,葛壮,朱平,李双异,汪景宽.不同施肥处理黑土覆膜后秸秆碳氮在团聚体中的固存特征.生态学报,2022,42(11): 4439-4450.

Liu X, Li T Y, An T T, Xu Y D, Ge Z, Zhu P, Li S Y, Wang J K. Sequestration characteristics of straw residue carbon and nitrogen in aggregates following plastic film mulching on Mollisols with different fertilization treatments. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4439-4450.

不同施肥处理黑土覆膜后秸秆碳氮在团聚体中的固存特征

刘旭¹, 李庭宇¹, 安婷婷¹, 徐英德¹, 葛壮¹, 朱平², 李双异^{1,*}, 汪景宽¹

1 沈阳农业大学土地与环境学院, 农业部东北耕地保育重点实验室和土壤资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866

2 吉林省农业科学院, 农业资源与环境研究所, 长春 130033

摘要:地膜覆盖是提高作物产量的重要措施,理解覆膜条件下黑土团聚体中外源碳和氮的固存特征,为深刻认识地膜覆盖措施的可持续应用提供理论依据。选取长期定位试验站(29年)不施肥(CK)、单施化肥(NPK)和有机肥配施化肥(MNPK)3个典型施肥处理,表层土壤(0—20 cm)添加¹³C¹⁵N双标记玉米秸秆后设置裸地和覆膜的田间原位微区培养试验,探讨不同施肥处理结合覆膜黑土团聚体中有机碳和全氮对秸秆来源碳和氮的响应。结果表明,与裸地相比,所有处理覆膜后微团聚体(<0.25 mm)中秸秆来源碳和氮的含量平均降低了26.49%和32.05%。覆膜MNPK与裸地处理相比大团聚体(>0.25 mm)中秸秆来源碳和氮的含量显著降低了35.58%和15.97%,但大团聚体中原土壤有机碳的含量提高了9.16%。在CK和NPK处理微团聚体中,秸秆来源碳占该粒级团聚体有机碳的比例表现为覆膜>裸地,而在MNPK处理各粒级团聚体中则表现为裸地>覆膜。无论覆膜与否,秸秆来源碳对团聚体有机碳和秸秆来源氮对团聚体全氮的贡献率受施肥处理的影响表现为CK>NPK>MNPK。且秸秆来源碳和氮占微团聚体中有机碳和全氮的比例大于大团聚体。总之,单施化肥处理结合覆膜促进了微团聚体中有机碳的更新;而有机肥配施化肥结合覆膜加快了各粒级团聚体中秸秆来源碳和氮的损失,也促进大团聚体中原土壤有机碳积累。

关键词: ¹³C¹⁵N双标记; 秸秆来源碳; 秸秆来源氮; 地膜覆盖; 土壤团聚体

Sequestration characteristics of straw residue carbon and nitrogen in aggregates following plastic film mulching on Mollisols with different fertilization treatments

LIU Xu¹, LI Tingyu¹, AN Tingting¹, XU Yingde¹, GE Zhuang¹, ZHU Ping², LI Shuangyi^{1,*}, WANG Jingkuan¹

1 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Laboratory of Arable Land Conservation (Northeast China), Ministry of Agriculture, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China

2 Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China

Abstract: Plastic film mulching is an important agricultural practice to improve crop yields and ensure sufficient food supply for the growing population. But the improvements in soil moisture and temperature under plastic film mulching stimulate the mineralization and loss of soil organic carbon. Any increase in crop yields must not be at the expense of soil quality. Studying the sequestration characteristics of newly added carbon and nitrogen in Mollisol's aggregates after plastic film mulching is crucial for the sustainable application of plastic film mulching. We collected topsoil samples (0—20 cm) from three fertilization treatments (no fertilization application, CK; inorganic fertilizer, NPK; and inorganic fertilizer plus manure, MNPK) at a 29-year long-term Mollisol experiment in Northeast China. We then mixed three fertilized soil samples with ¹³C¹⁵N double-labeled maize straw, and conducted a 900-day *in-situ* micro-plot incubation experiment without (bare)

基金项目: 国家自然科学基金(41771328); 辽宁省教育厅科学研究一般项目(LSNJC201910); 辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10200034)

收稿日期: 2021-04-06; **网络出版日期:** 2022-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shy_li@syau.edu.cn

and with plastic film mulching. The objective of this study was to understand how plastic film mulching modified the dynamics of straw residue carbon and nitrogen incorporation into soil aggregates under various fertilizer management strategies. The results showed that compared with Mollisols of three fertilizer management strategies under bare conditions, plastic film mulching decreased straw residue carbon and nitrogen contents by 26.49% and 32.05% among the microaggregates (<0.25 mm), respectively. As for the MNPK treatment under bare conditions, plastic film mulching significantly decreased straw residue carbon and nitrogen contents by 35.58% and 15.97% in the macroaggregates (>0.25 mm), but increased native soil organic carbon content by 9.16% in the macroaggregates. Plastic film mulching increased the contribution percentage of straw residue carbon in organic carbon of the CK and NPK treatments among the microaggregates, when compared to that of corresponding bare conditions. But in macroaggregates and microaggregates of the MNPK treatment, the contribution percentage of straw residue carbon in organic carbon was significantly lower under plastic film mulching conditions than that under bare conditions. Regardless of bare or plastic film mulching, the contribution percentage of straw residue carbon in organic carbon and straw residue nitrogen in total nitrogen in macroaggregates and microaggregates were affected by fertilizer management strategies, and the contribution percentage of straw residue carbon and straw residue nitrogen in both aggregates decreased in the order of CK>NPK>MNPK. Moreover, the contribution percentage of straw residue carbon in organic carbon and straw residue nitrogen in total nitrogen in microaggregates were larger than those in macroaggregates. Overall, plastic film mulching promoted the renewal of organic carbon in the microaggregates of the NPK treatment; while in the MNPK treatment, plastic film mulching accelerated the loss of straw residue carbon and nitrogen in macroaggregates and microaggregates, it also played a positive feedback effect on the accumulation of native soil organic carbon among the macroaggregates.

Key Words: $^{13}\text{C}^{15}\text{N}$ double-labeled; straw residue carbon; straw residue nitrogen; plastic film mulching; soil aggregates

土壤有机碳和氮的物质循环与能量流动是农田生态系统最基本的生态过程,该过程对农田生态系统的稳定性和生产力产生重要影响^[1]。团聚体是土壤有机碳和氮固定的重要场所,土壤有机碳和氮不仅可与矿物颗粒胶结形成稳定的团聚体,团聚体的物理保护机制还将固持在其中的有机碳和氮与微生物和胞外酶之间形成空间“隔离”^[2-3],从而减少土壤有机碳和氮的损失。此外,不同粒级团聚体对有机碳和氮的固持能力各不相同^[4]。因此,了解农田土壤有机碳和氮在团聚体中的固定和转化具有重要意义。

在旱作农业生产中,地膜覆盖在作物增产方面发挥了重大作用,但覆膜后良好的水热条件也提高了微生物活性,加速土壤有机碳和氮的转化^[5-6]。目前,关于地膜覆盖对土壤有机碳和氮含量的影响仍存在一定的不确定性。研究发现长期地膜覆盖能向土壤中输入更多的根生物量及根际碳沉积物^[7-8],通过不断增加外源有机碳的输入量来弥补土壤有机碳的矿化量,进而提高和维持土壤有机碳的含量。然而地膜覆盖对外源有机碳输入的影响很大程度上取决于施肥类型。在施用有机肥结合覆膜条件下土壤有机碳的储量下降,需要额外投入更多的有机物质来提高土壤有机碳储量^[9]。此外,覆膜还可以通过减少干湿交替强度来影响团聚体的形成与稳定过程^[10],使得团聚体中有机碳和氮再次经历生化分解以及物理重新分配的过程^[11]。目前,关于长期施肥和地膜覆盖这双重因素对团聚体有机碳和全氮对外源有机碳和氮的响应鲜有报道,尤其是在较长时间尺度内。对于土壤有机碳平衡和氮素循环而言,地膜覆盖是否是一种可持续的农田管理措施还尚不清楚。东北黑土区是我国重要的粮食生产基地,在保障粮食安全中发挥着举足轻重的作用。因此,本研究利用黑土长期定位施肥试验,通过 $^{13}\text{C}^{15}\text{N}$ 同位素示踪技术探究不同施肥处理黑土覆膜 900 d 后秸秆来源碳和氮在团聚体中的固存特征,旨在为旱地农业生产中地膜覆盖措施的可持续应用以及覆膜措施下黑土的肥力培育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验在农业部公主岭黑土生态环境重点野外科学观测试验站($43^{\circ}30'\text{N}$, $124^{\circ}48'\text{E}$)进行。该试验站建于 1990 年,属于温带大陆性季风气候,年平均气温 5.6°C ,年平均降水量 594.8 mm,无霜期 144 d。土壤为发育

在第四纪黄土状沉积物上的中层典型黑土。本试验选取其中 3 种典型施肥(29 年)处理进行研究,分别为不施肥(CK)、单施化肥(NPK;施化肥 N 165 kg/hm²、P₂O₅ 82.5 kg/hm²和 K₂O 82.5 kg/hm²)和有机肥配施化肥(MNPK;施有机肥含 N 为 115 kg/hm²、施化肥 N 50 kg/hm²、P₂O₅ 82.5 kg/hm²和 K₂O 82.5 kg/hm²)。试验前(2018 年)土壤的基本理化性状见表 1。

供试有机物料为¹³C¹⁵N 双标记的玉米秸秆,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 246.9‰, $\delta^{15}\text{N}$ 值为 11231.5‰,全碳含量 355.85 g/kg,全氮含量 10.20 g/kg,标记过程参见 An 等^[12]和徐英德等^[13]。

表 1 供试土壤的基本理化性质(2018 年)

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil in 2018

施肥处理 Fertilization treatment	土壤有机碳 Soil organic carbon/(g/kg)	$\delta^{13}\text{C}$ 值 $\delta^{13}\text{C}$ value/‰	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	$\delta^{15}\text{N}$ 值 $\delta^{15}\text{N}$ value/‰	碳氮比 C/N ratio
不施肥(CK) No fertilization application	15.50±0.25	-19.07±0.02	1.47±0.12	4.41±0.35	10.59±0.95
单施化肥(NPK) Inorganic fertilizer	14.86±0.27	-19.47±0.26	1.55±0.06	4.38±0.13	9.62±0.20
有机肥配施化肥(MNPK) Inorganic fertilizer plus manure	25.20±0.60	-19.42±0.32	2.53±0.05	6.50±0.13	9.96±0.27

1.2 研究方法

田间微区培养试验于 2018 年在长期定位施肥小区附近进行,避免秸秆残体对土壤的影响。首先挖 4 个长×宽×高为 0.9 m×0.6 m×0.4 m 的微区,然后将聚氯乙烯材料的盒子(长×宽×高为 0.9 m×0.6 m×0.6 m)分别垂直插入其中。为避免其他土壤对微区试验的影响,盒顶端高出地面 20 cm。盒子底部与顶部连通以允许排水。设置不覆膜+不加秸秆、覆膜+不加秸秆、不覆膜+加标记秸秆和覆膜+加标记秸秆 4 种微区,每种微区内 3 个施肥土壤均设置 3 次重复,计 9 个隔断(0.3 m×0.2 m 隔断),共 36 个处理。将 3 个施肥处理中 0—40 cm 土壤挖出分层堆放,再把挖出的 20—40 cm 土壤回填到相应 PVC 隔板中,采集的 0—20 cm 表层土壤挑出根系、石块等其他物质后过 7 mm 筛子,均匀混入¹³C¹⁵N 双标记的玉米秸秆(大小为 0.5—1.0 cm,秸秆添加量为 1 kg 土壤上加 2.3 g 秸秆)后,还入相应的微区隔断内。覆膜处理在地表加盖透光地膜。在试验期间,所有微区均未种植作物。

于地膜覆盖后第 900 天(2020 年 10 月)采集 0—20 cm 表层土壤。采样时,利用不锈钢铲在各微区三点采集原状土样,沿自然裂隙将原状土壤轻轻掰成碎块,尽量避免挤压和土壤结构破坏,采用硬质塑料保鲜盒将土样带回实验室。在室内将新鲜土壤样品中的石粒、植物碎片以及未完全分解的玉米秸秆(>0.5 cm)挑出。

1.3 测定方法

1.3.1 团聚体分级

本研究采用干筛法进行团聚体分级^[14]:将新鲜土壤风干至土壤含水量为 8%—10%左右时,进行团聚体分级。称取 100 g 土样(<5 mm)置于自动筛分仪(Retsch AS 200,德国)0.25 mm 套筛上,在振幅为 1.5 mm 条件下震荡 2 min,得到大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm),分别称重。然后将各粒级土样风干后研磨并过 100 目筛,供分析团聚体中有机碳和全氮的含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值。

1.3.2 团聚体中有机碳和全氮的含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的测定

土壤及团聚体中有机碳和全氮的含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值利用元素分析仪-稳定同位素比例质谱联用仪(EA-IRMS, Element analysis Stable 100 Isotope Ratio Mass Spectrometer, 德国)测定。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的测定分别以美国南卡罗来纳州白垩纪皮狄组层中的拟箭石化石(Pee Dee Belemnite, PDB)为标准物质)和 0.0036765(以纯净大气氮(Air Nitrogen, AN)为标准物质)^[15—16]。

1.4 计算方法

某粒级团聚体中有机碳($C_{\text{aggregate}}$, g/kg soil)和全氮($N_{\text{aggregate}}$, g/kg soil)含量的计算公式:

$$C_{\text{aggregate}} = C_{\text{con-aggregate}} \times M_{\text{aggregate}} \quad (1)$$

$$N_{\text{aggregate}} = N_{\text{con-aggregate}} \times M_{\text{aggregate}} \quad (2)$$

式中, $C_{\text{aggregate}}$ ($N_{\text{aggregate}}$) 为某粒级团聚体有机碳(氮)测试浓度 (g/kg soil); $M_{\text{aggregate}}$ 为某粒级团聚体所占的质量百分比 (%)。

有机碳中秸秆来源碳贡献率 (F_{mc} , %) 和全氮中秸秆来源氮贡献率 (F_{mn} , %) 的计算公式如下:

$$F_{\text{mc}} = \frac{\delta^{13}C_{\text{sm}} - \delta^{13}C_{\text{s}}}{\delta^{13}C_{\text{m}} - \delta^{13}C_{\text{s}}} \times 100 \quad (3)$$

$$F_{\text{mn}} = \frac{\delta^{15}N_{\text{sm}} - \delta^{15}N_{\text{s}}}{\delta^{15}N_{\text{m}} - \delta^{15}N_{\text{s}}} \times 100 \quad (4)$$

公式(3)中 $\delta^{13}C_{\text{sm}}$ (‰) 为添加秸秆处理土壤有机碳的 $\delta^{13}C$ 值; $\delta^{13}C_{\text{s}}$ (‰) 为不添加秸秆处理土壤有机碳的 $\delta^{13}C$ 值; $\delta^{13}C_{\text{m}}$ (‰) 为初始添加秸秆的 $\delta^{13}C$ 值。公式(4)中 $\delta^{15}N_{\text{sm}}$ (‰) 为添加秸秆处理土壤全氮的 $\delta^{15}N$ 值; $\delta^{15}N_{\text{s}}$ (‰) 为不添加秸秆处理土壤全氮的 $\delta^{15}N$ 值; $\delta^{15}N_{\text{m}}$ (‰) 为初始添加秸秆的 $\delta^{15}N$ 值。

有机碳中原土壤有机碳贡献率 (F_{sc} , %) 和全氮中原土壤氮贡献率 (F_{sn} , %) 的计算公式如下:

$$F_{\text{sc}} = 100 - F_{\text{mc}} \quad (5)$$

$$F_{\text{sn}} = 100 - F_{\text{mn}} \quad (6)$$

有机碳中秸秆来源碳含量 (C_{mc} , g/kg) 和全氮中秸秆来源氮含量 (C_{mn} , g/kg) 的计算公式:

$$C_{\text{mc}} = \frac{C_{\text{smc}} \times F_{\text{mc}}}{100} \quad (7)$$

$$C_{\text{mn}} = \frac{C_{\text{smn}} \times F_{\text{mn}}}{100} \quad (8)$$

公式(7)中 C_{smc} (g/kg) 为添加秸秆处理有机碳的含量。公式(8)中 C_{smn} (g/kg) 为添加秸秆处理土壤全氮含量。

土壤有机碳中原土壤有机碳含量 (C_{sc} , g/kg) 和全氮中原土壤氮含量 (C_{sn} , g/kg) 的计算公式:

$$C_{\text{sc}} = \frac{C_{\text{smc}} \times F_{\text{sc}}}{100} \quad (9)$$

$$C_{\text{sn}} = \frac{C_{\text{smn}} \times F_{\text{sn}}}{100} \quad (10)$$

1.5 数据处理及结果分析

本文中的数据以 3 个重复的平均值及其标准差表示。运用 SPSS 19.0 统计分析软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和差异性显著分析 (T 检验和 Duncan 检验)。通过 Origin 2018 软件进行简单回归分析, 建立了有机碳 (Y) 与氮 (X) 相关参数的线性关系。图表的绘制采用 Origin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 全土和团聚体中有机碳和全氮的含量

与裸地相比, 地膜覆盖显著降低单施化肥 (NPK) 处理土壤有机碳的含量 ($P < 0.05$, 图 1)。地膜覆盖、施肥以及两者间的交互作用对有机碳和全氮含量的影响随团聚体粒级的不同而呈现较大差异 (图 1 和表 2)。与裸地不施肥 (B-CK) 和裸地单施化肥 (B-NPK) 处理相比, 覆膜对大团聚体有机碳含量影响不显著 ($P > 0.05$), 但在有机肥配施化肥 (MNPK) 处理中, 覆膜条件下大团聚体有机碳含量较裸地处理显著提高了 8.68% ($P < 0.05$)。在微团聚体中, 与 B-CK、B-NPK 和裸地有机肥配施化肥 (B-MNPK) 相比, 覆膜不施肥 (M-CK)、覆膜单施化肥 (M-NPK) 和覆膜有机肥配施化肥 (M-MNPK) 处理的有机碳含量分别降低 34.12%、14.30% 和 30.50%。与 M-CK 处理相比, M-NPK 处理大团聚体有机碳含量降低了 5.41%。对于全氮而言, 在微团聚体

中,与 B-CK、B-NPK 和 B-MNPK 相比,M-CK、M-NPK 和 M-MNPK 处理的全氮含量分别降低了 35.56%、10.27%和 30.87%。与微团聚体相比,大团聚体有机碳和全氮的含量较高。

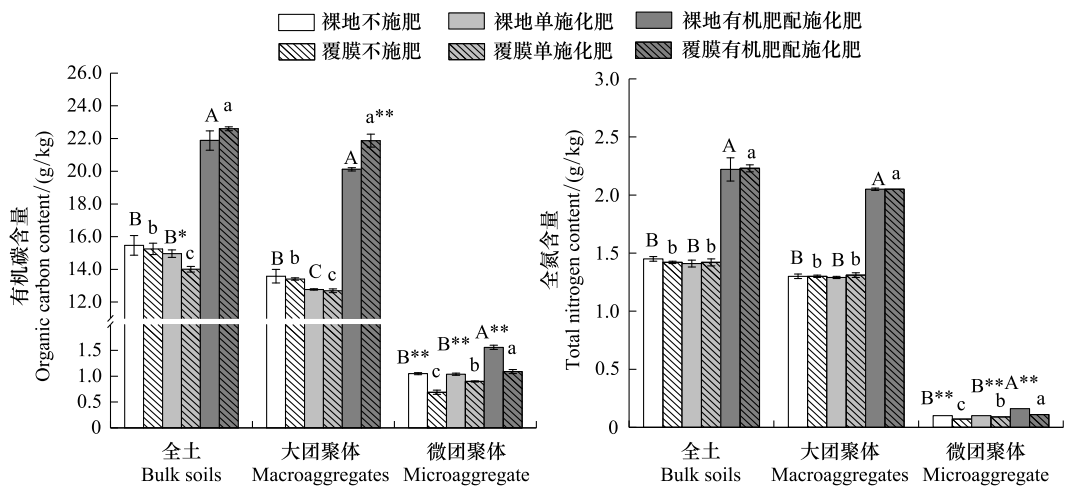


图 1 全土及团聚体中有机碳和全氮的含量

Fig.1 Soil organic carbon and total nitrogen contents in bulk soils and aggregates

不同大写字母表示裸地条件下不同施肥处理间差异显著 ($P<0.05$);不同小写字母表示覆膜条件下不同施肥处理间差异显著 ($P<0.05$); * 表示相同施肥处理裸地和覆膜间差异显著 ($P<0.05$); * * 表示相同施肥处理裸地和覆膜间差异极显著 ($P<0.01$)

表 2 覆膜和施肥对土壤中各变量影响的方差分析

Table 2 Variance analysis of the effects of mulching and fertilization on soil variables

因子 Factor	有机碳 OC/(g/kg) F (P)	全氮 TN/(g/kg) F (P)	有机碳中秸	全氮中秸秆	有机碳中原	全氮中原
			秆来源碳 $C_{mc}/(g/kg)$ F (P)	秆来源氮 $C_{mn}/(g/kg)$ F (P)	土壤有机碳 $C_{sc}/(g/kg)$ F (P)	土壤氮 $C_{sn}/(g/kg)$ F (P)
全土 Bulk soils	覆膜 (M)	0.34 (0.57)	1.26 (0.28)	5.22 (0.04)	0.28 (0.60)	0.01 (0.93)
	施肥 (F)	349.48 (<0.01)	38.56 (<0.01)	345.14 (<0.01)	344.89 (<0.01)	289.06 (<0.01)
	覆膜×施肥 M×F	3.38 (0.07)	1.69 (0.23)	27.51 (<0.01)	3.42 (0.07)	0.21 (0.81)
大团聚体 Macroaggregates	M	9.41 (0.01)	3.00 (0.12)	4.05 (0.07)	9.24 (0.01)	0.68 (0.43)
	F	1024.92 (<0.01)	23.62 (<0.01)	137.21 (<0.01)	969.91 (<0.01)	2341.84 (<0.01)
	M×F	14.28 (<0.01)	20.06 (<0.01)	8.26 (0.01)	14.83 (<0.01)	0.52 (0.61)
微团聚体 Microaggregates	M	286.21 (<0.01)	323.93 (<0.01)	156.25 (<0.01)	271.14 (<0.01)	308.63 (<0.01)
	F	206.19 (<0.01)	34.54 (<0.01)	85.75 (<0.01)	218.33 (<0.01)	285.86 (<0.01)
	M×F	24.33 (<0.01)	100.03 (<0.01)	10.75 (<0.01)	21.63 (<0.01)	39.65 (<0.01)

施肥:不施肥、单施化肥和有机肥配施化肥;覆膜:裸地与地膜覆膜;OC:有机碳 organic carbon;TN:全氮 total nitrogen; C_{mc} :有机碳中秸秆来源碳 the content of straw residue carbon in organic carbon; C_{mn} :全氮中秸秆来源氮 the content of straw residue nitrogen in total nitrogen; C_{sc} :有机碳中原土壤有机碳 the content of native soil organic carbon in organic carbon; C_{sn} :全氮中原土壤氮 the content of native soil nitrogen in total nitrogen

2.2 全土和团聚体中不同来源碳和氮的含量

在 NPK 处理中,与裸地相比,地膜覆盖后全土中原土壤有机碳含量显著降低 6.40% ($P<0.05$, 图 2)。此外,覆膜、施肥以及覆膜与施肥的交互作用对不同来源碳和氮含量的影响随团聚体粒级的不同而呈现差异 ($P<0.05$, 表 2 和图 2)。在 MNPK 处理大团聚体中,覆膜条件下秸秆来源碳和氮含量较裸地分别降低 35.58% 和 15.97%,但原土壤有机碳的含量显著提高 9.16% ($P<0.05$)。在微团聚体中秸秆来源碳和氮以及原土壤有机碳和氮的含量均表现为裸地大于覆膜,与 B-CK、B-NPK 和 B-MNPK 处理相比,M-CK、M-NPK 和 M-MNPK 处理中秸秆来源碳含量分别降低 20.60%、5.26% 和 53.60%,秸秆来源氮含量分别降低 33.06%、13.58% 和 49.50%。与 M-CK 处理相比,M-NPK 处理大团聚体中秸秆来源碳的含量显著降低 35.70% ($P<0.05$)。无论裸地还是覆膜,CK 处理全土中秸秆来源碳和氮的含量最高 ($P<0.05$)。与微团聚体相比,大团聚体中不同来源

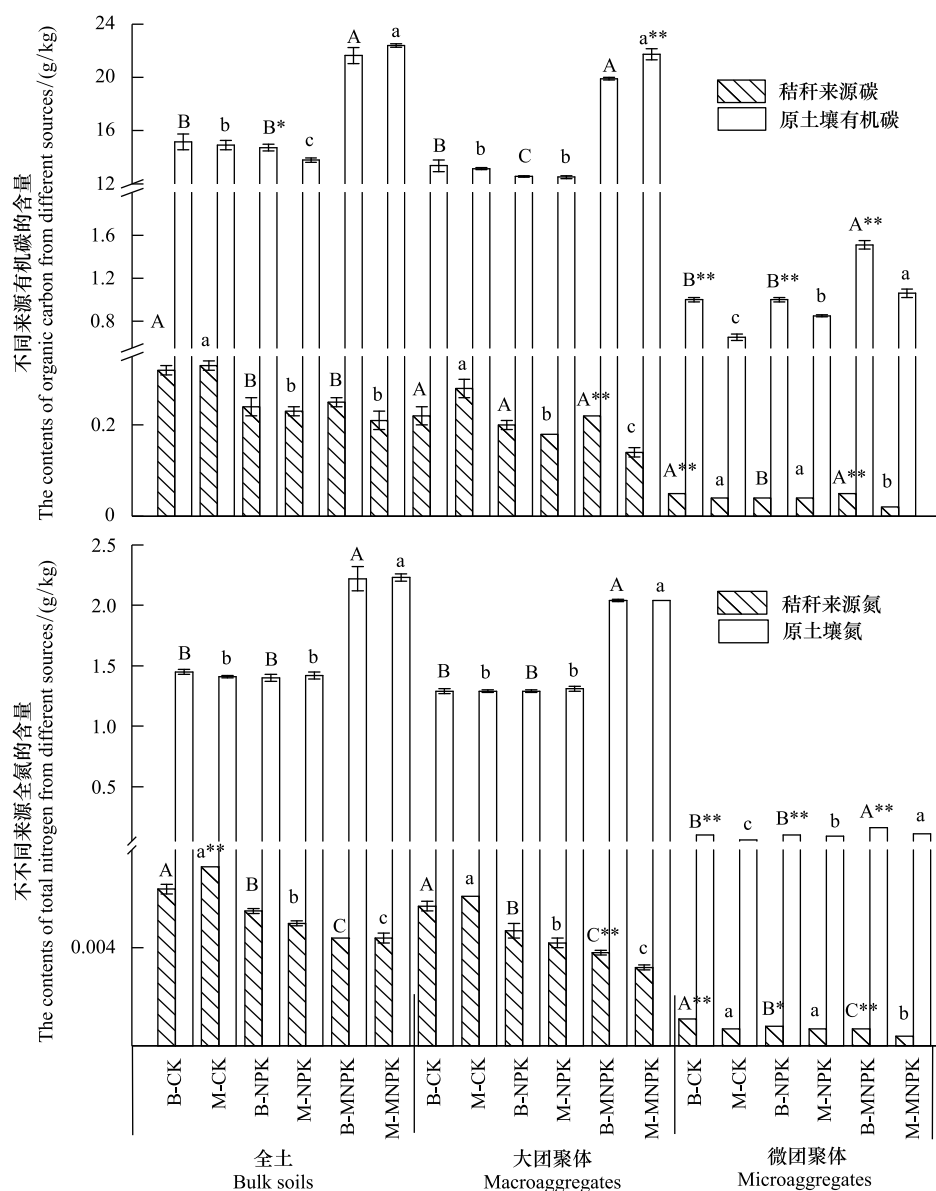


图2 土壤及团聚体中不同来源碳和氮的含量

Fig.2 The contents of carbon and nitrogen from different sources in bulk soils and aggregates

B-CK: 裸地不施肥 No fertilization application with bare; B-NPK: 裸地单施化肥 Inorganic fertilizer with bare; B-MNPK: 裸地有机肥配施化肥 Inorganic fertilizer plus manure with bare; M-CK: 覆膜不施肥 No fertilization application with plastic film mulching; M-NPK: 覆膜单施化肥 Inorganic fertilizer with plastic film mulching; M-MNPK: 覆膜有机肥配施化肥 Inorganic fertilizer plus manure with plastic film mulching

有机碳和全氮的含量较高。

2.3 全土和团聚体中不同来源碳和氮的贡献率

与 B-CK 处理相比, M-CK 处理全氮中秸秆来源氮的贡献率显著提高 ($P < 0.05$, 图 3)。F-MNPK 处理大团聚体有机碳中秸秆来源碳的贡献率和全氮中秸秆来源氮的贡献率较裸地分别降低 40.65% 和 16.02% ($P < 0.05$)。与 B-CK 和 B-NPK 相比, M-CK 和 M-NPK 处理微团聚体中秸秆来源碳的贡献率分别提高 20.57% 和 10.51%, 而该值在 MNPK 处理中显著降低 33.16% ($P < 0.05$)。但覆膜对 CK 和 NPK 处理微团聚体全氮中秸秆来源氮贡献率的变化影响不显著 ($P > 0.05$), MNPK 处理微团聚体全氮中秸秆来源氮的贡献率为裸地大于覆

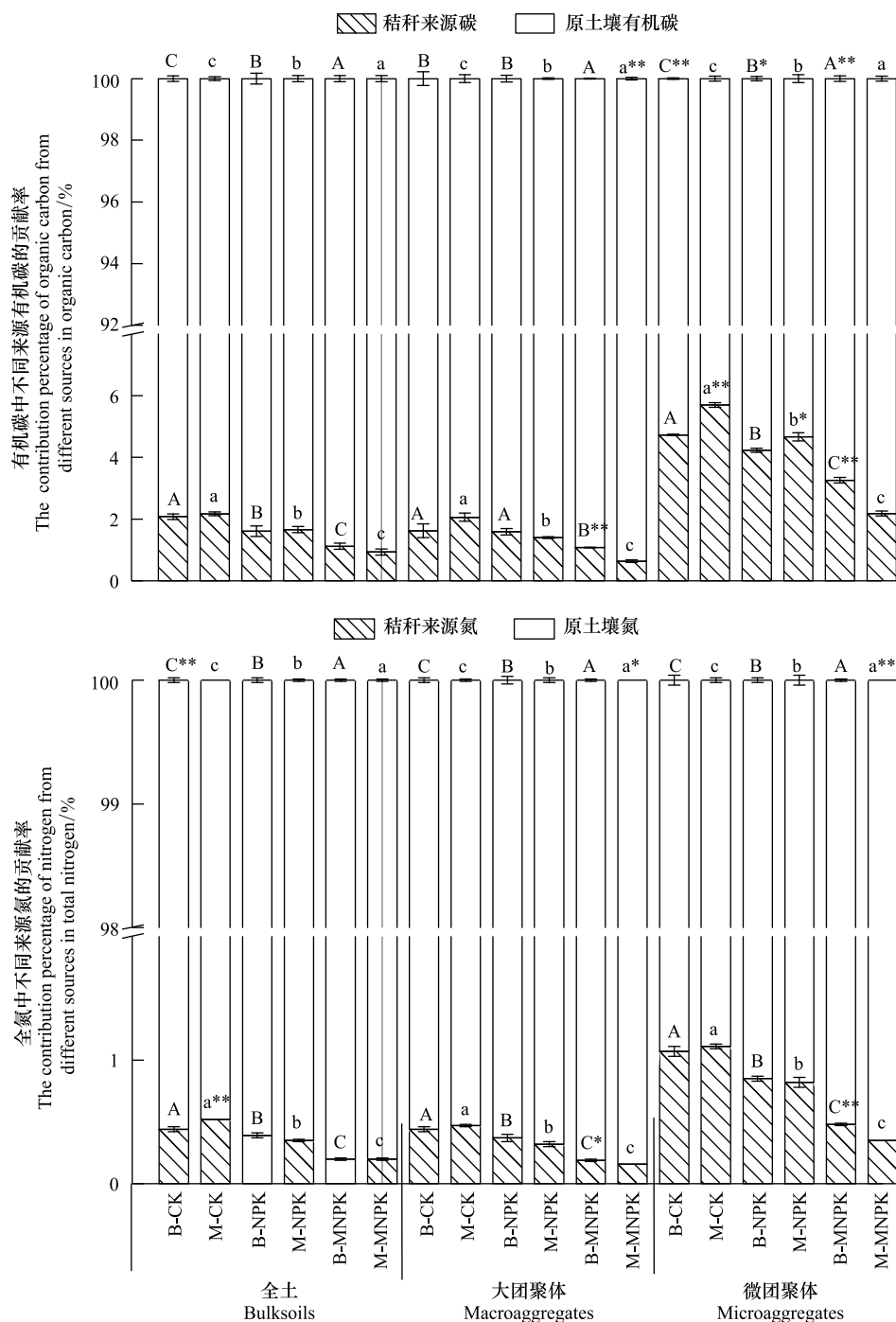


图 3 土壤及团聚体中不同来源有机碳和氮的贡献率

Fig.3 The contribution percentage of organic carbon and nitrogen from different sources in bulk soils and aggregates

膜。无论覆膜与否,CK 处理各粒级团聚体内有机碳中秸秆来源碳和全氮中秸秆来源氮的贡献率最高 ($P < 0.05$)。与微团聚体相比,大团聚体有机碳中秸秆来源碳的贡献率和全氮中秸秆来源氮的贡献率较低。

2.4 覆膜条件下有机碳和全氮参数间的相关关系

在覆膜条件下,随团聚体粒径的减小,秸秆来源碳含量与秸秆来源氮含量的线性方程斜率变化相似,而原土壤有机碳含量和原土壤氮含量的线性方程斜率随团聚体粒径的减小而减小(表 3)。无论裸地还是覆膜条件下,土壤有机碳中秸秆来源碳的贡献率和全氮中秸秆来源氮的贡献率呈显著的正相关关系 ($n = 54, P < 0.01$)(图 4)。且秸秆来源碳的含量与秸秆来源氮的含量也呈显著的正相关关系 ($n = 54, P < 0.01$)。但秸秆来源碳含量和秸秆来源氮含量的线性方程斜率与原土壤有机碳含量和原土壤氮含量的线性方程斜率不相同。

表 3 团聚体中有机碳与全氮参数间的相关关系

Table 3 The relationship between organic carbon and total nitrogen related parameters in aggregates

	裸地条件 Bare conditions	覆膜条件 Plastic film mulching conditions
大团聚体 (MA) Macroaggregates	$OC = 9.23TN + 1.24$ ($R^2 = 0.99^{**}$)	$OC = 11.81TN - 2.35$ ($R^2 = 0.98^{**}$)
微团聚体 (MI) Microaggregates	$OC = 8.94TN + 0.16$ ($R^2 = 0.95^{**}$)	$OC = 8.98TN + 0.11$ ($R^2 = 0.91^{**}$)
MA	$C_{mc} = 7.09C_{mn} + 0.18$ ($R^2 = 0.09$)	$C_{mc} = 48.28C_{mn} - 0.02$ ($R^2 = 0.95^{**}$)
MI	$C_{mc} = -0.45C_{mn} + 0.05$ ($R^2 = 0.00$)	$C_{mc} = 48.98C_{mn} + 0.00$ ($R^2 = 0.94^{**}$)
MA	$C_{sc} = 9.20C_{sn} + 1.11$ ($R^2 = 0.99^{**}$)	$C_{sc} = 11.90C_{sn} - 2.63$ ($R^2 = 0.99^{**}$)
MI	$C_{sc} = 8.83C_{sn} + 0.13$ ($R^2 = 0.95^{**}$)	$C_{sc} = 9.27C_{sn} + 0.05$ ($R^2 = 0.92^{**}$)

* 代表显著相关 ($P < 0.05$), ** 代表极显著相关 ($P < 0.01$)

2.5 覆膜条件下有机碳与全氮的比值

与 B-NPK 处理相比,地膜覆盖后全土和微团聚体中有机碳/全氮比值显著降低,但秸秆来源碳/秸秆来源氮比值的变化无显著差异 ($P > 0.05$, 表 4)。在 MNPK 处理中,裸地和覆膜条件下大团聚体中土壤有机碳/全氮比值分别为 9.83 和 10.86,秸秆来源碳/秸秆来源氮比值分别为 57.07 和 43.69。无论裸地还是覆膜条件下,与 CK 处理相比,MNPK 处理全土中土壤有机碳/全氮比值较低,但秸秆来源碳/秸秆来源氮较高。

表 4 全土和团聚体中有机碳和全氮比

Table 4 The ratio of organic carbon to total nitrogen in bulk soils and soil aggregates

		有机碳/全氮 Organic carbon/total nitrogen			秸秆来源碳/秸秆来源氮 Straw residue carbon/straw residue nitrogen		
		不施肥 (CK)	单施化肥 (NPK)	有机肥配 施化肥 (MNPK)	不施肥 (CK)	单施化肥 (NPK)	有机肥配 施化肥 (MNPK)
全土 Bulk soils	裸地条件	10.66A	10.61A *	9.89A	50.13AB	43.74B	56.02A
	覆膜条件	10.73a	9.86b	10.14b	45.21a	46.33a	47.24a
大团聚体 Macroaggregates	裸地条件	10.47A	9.9B	9.83B	38.60B	43.14B	57.07A **
	覆膜条件	10.34a	9.67b	10.68a **	45.44a	42.88a	43.69a
微团聚体 Microaggregates	裸地条件	10.32A	10.66A *	10.02A	45.78C	52.88B	68.52A
	覆膜条件	10.63a	10.18a	10.06a	54.55a	58.06a	62.96a *

3 讨论

3.1 覆膜对不同施肥黑土团聚体中各来源有机碳和全氮含量的影响

方差分析结果表明覆膜对团聚体中不同来源有机碳和氮含量的影响随团聚体粒级的不同而呈现一定的差异(表 2)。这说明地膜覆盖后秸秆来源碳和秸秆来源氮以及原土壤有机碳与原土壤氮在团聚体中的赋存机制各不相同。与各施肥处理裸地相比,地膜覆盖降低微团聚体中秸秆来源碳和氮以及原土壤有机碳和原土

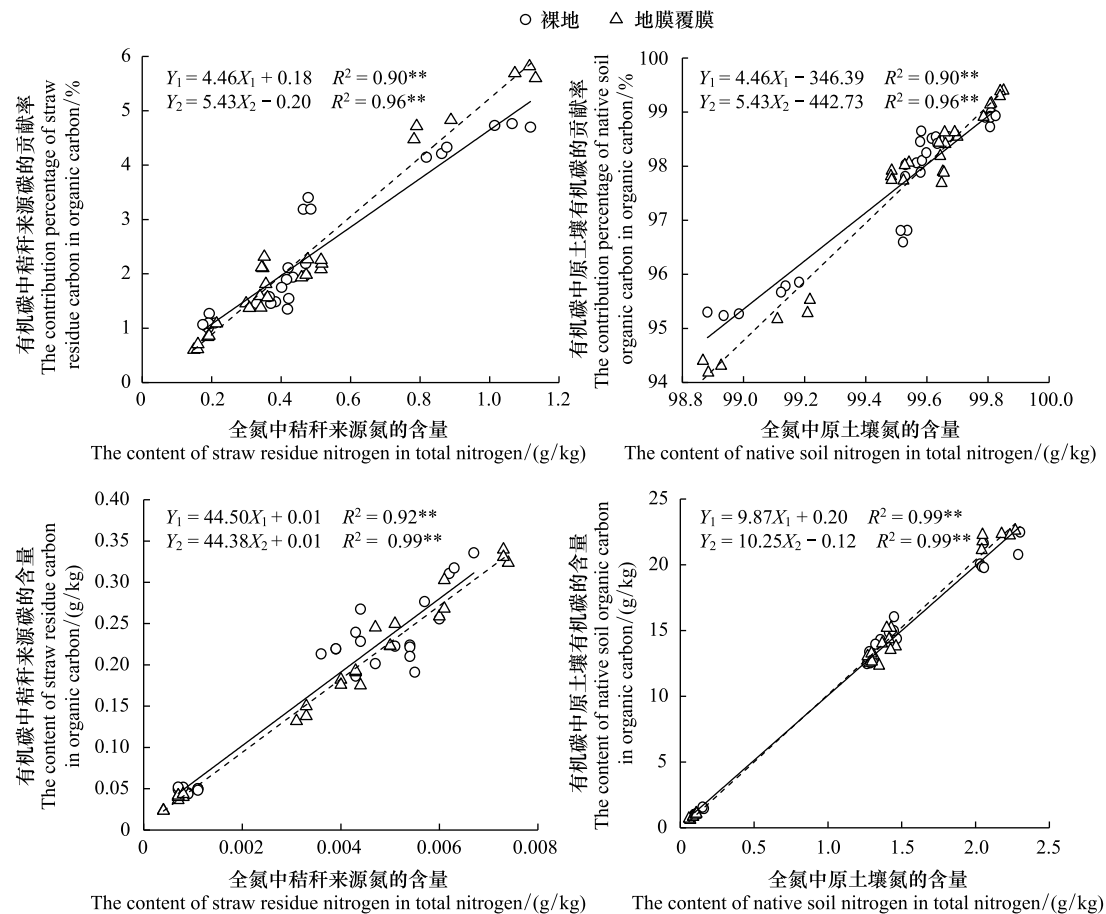


图4 有机碳与全氮参数间的相关关系

Fig.4 The relationship between organic carbon and total nitrogen parameters

壤氮的含量。地膜覆盖可直接降低雨滴对团聚体的破坏性影响^[17],而在裸地条件下雨水可快速进入土壤孔隙中,土壤干湿交替强度较高,对粘粒部分产生不均匀的水合作用和膨胀作用,使得存在于毛细管孔隙中的闭蓄态空气被压缩,造成团聚体内部压强增大而发生崩解^[18]。随着干湿交替次数的增加,团聚体破碎后形成的微团聚体增多^[19]。因此,裸地条件下微团聚体各来源有机碳和全氮含量高于地膜覆盖。此外,与裸地相比,覆膜单施化肥处理微团聚体中不同来源有机碳和氮含量的下降幅度最小(图2),说明在单施化肥处理中覆膜能减缓微团聚体有机碳和全氮的分解速率。而在有机肥配施化肥处理中,覆膜在显著降低大团聚体中秸秆来源碳和氮含量的同时,还提高了大团聚体中原土壤有机碳的含量。在有机肥和化肥配施土壤中进行地膜覆盖后,良好的水热条件和充足的土壤养分极大促进了土壤微生物的生长、繁殖及代谢活动^[20-21],增加的土壤微生物量和活性加速大团聚体中秸秆来源碳和氮的矿化。与此同时添加秸秆促成微生物对分解底物的选择性利用,削弱微生物对原土壤有机碳的利用^[22],进而促进大团聚体中原土壤有机碳的积累。

此外,秸秆来源碳和氮在土壤中的固持特征还受施肥措施的影响。本研究发现与覆膜不施肥处理相比,覆膜单施化肥处理大团聚体中秸秆来源碳含量显著降低 35.70%,而微团聚体中原土壤有机碳含量显著提高 31.46%(图2),说明覆膜单施化肥处理大团聚体中秸秆来源碳的损失导致其土壤有机碳含量低于覆膜不施肥处理(图1和图2)。研究发现与不施肥土壤相比,长期施用化肥(12年)土壤中水稳性团聚体的平均重量直径降低了 55%^[23],这意味着秸秆来源碳受大团聚体的物理保护作用变弱,覆膜条件下微生物数量和酶活性的增加提高大团聚体中秸秆来源碳被分解的可能性。

3.2 覆膜对不同施肥黑土团聚体中各来源碳和氮贡献率的影响

地膜覆盖通过改善水热状况来提高土壤微生物活性和酶活性^[24],进而影响外源碳氮的分解动力学及其

在土壤中的积累模式。在单施化肥处理中,秸秆来源碳对微团聚体有机碳的贡献率表现为覆膜大于裸地,而在有机肥配施化肥处理各粒级团聚体中,秸秆来源碳对有机碳以及秸秆来源氮对全氮的贡献率均表现为裸地大于覆膜(图2)。与有机肥配施化肥处理相比,未分解或半分解的秸秆在土壤微生物数量少及活性低的单施化肥土壤中残留的相对较多^[25]。因此,在单施化肥土壤中覆膜可促进微生物对更多残留秸秆来源碳的转化。由于单施化肥土壤中无机胶体较多,使得秸秆来源碳以有机-无机复合体形式积累在微团聚体中^[26];而在有机肥配施化肥土壤中,覆膜加快秸秆来源碳和氮在大团聚体和微团聚体中的矿化。在养分有效性较高的土壤中,改善的水热条件和添加的秸秆为微生物提供适宜的环境和初始的能量来源,微生物活性能被最大程度地激发^[27],进而加速各粒级团聚体中秸秆来源碳和氮的分解。

以往的研究表明在初始有机碳和全氮含量低的土壤中,外源有机碳和外源氮的贡献率越大^[13,28]。本研究通过 900 d 的田间原位培养试验也发现,与有机肥配施化肥处理相比,不施肥处理全土和各粒级团聚体有机碳中秸秆来源碳的贡献率以及全氮中秸秆来源氮的贡献率显著提高(图3)。由于不施肥土壤中缺乏微生物生存所需的氮素养分,使得微生物通过降解玉米秸秆来优先利用较易分解秸秆中的氮素来满足其对氮的需求^[29]。与此同时秸秆来源碳和氮可被土壤微生物同化为微生物生物量碳和氮,随后以土壤微生物死亡残体的形式保留在土壤中^[30],最终导致不施肥土壤团聚体有机碳中秸秆来源碳的贡献率以及全氮中秸秆来源氮的贡献率显著提高(图3),有利于土壤有机碳和全氮的更新。土壤有机碳/全氮比值也是影响土壤有机碳和氮循环的重要因子^[31],全土有机碳/全氮的结果显示(表4),与不施肥处理相比,有机肥配施化肥处理中秸秆来源碳/秸秆来源氮比值较高,说明在全土有机碳/全氮比值低的有机肥配施化肥处理中,添加秸秆可能引起土壤有机碳的正激发效应。由此可以看出,土壤养分的供应和土壤有机碳/全氮比值通过影响微生物的活性来改变秸秆来源碳和氮在土壤中的固持动态^[32-33]。

3.3 覆膜条件下土壤有机碳及全氮的协同关系

回归分析表明覆膜条件下,随团聚体粒径的减小,秸秆来源碳与氮含量的线性方程斜率变化相似,而原土壤有机碳和氮含量的线性方程斜率随团聚体粒径的减小而减小(表3)。研究发现团聚体粒径越小,比表面积越大,对有机氮的吸附能力越强^[34],并且土壤颗粒表面带有负电荷会使较小粒级团聚体对铵根离子的吸附能力更大^[35],导致微团聚体具有很强的保存和吸附氮素养分的能力。当微团聚体中输入易分解的碳源后,微生物将分解较难利用但碳氮比较低的土壤有机质^[36],以利用其中的氮素来满足自身需要,因此,覆膜条件下,原土壤有机碳在微团聚体中的损失比其在大团聚体中的分解更受氮素限制。此外,无论覆膜与否,秸秆来源碳和氮以及原土壤有机碳和氮的相关参数间均存在协同关系(图4),该结果从土壤有机碳和全氮的来源以及土壤的物理组成等方面支持了陆地生态系统中有机碳和氮耦合循环的理论框架。该结果与先前观察到土壤有机碳和全氮的固定存在协同作用相一致^[37-38],但秸秆来源碳与氮的积累与原土壤有机碳和氮的损失不同步(图4)。

4 结论

地膜覆盖显著降低了微团聚体中不同来源有机碳和氮的含量。单施化肥处理覆膜后提高了秸秆来源碳对微团聚体有机碳的贡献率,促进了微团聚体中碳源的更新。但覆膜条件下,单施化肥可能引起大团聚体中秸秆来源碳的分解,导致其全土有机碳含量显著低于覆膜不施肥处理。有机肥配施化肥覆膜后加快了各粒级团聚体中秸秆来源碳和氮的分解,并有利于大团聚体中原土壤有机碳的积累。无论覆膜与否,不施肥处理秸秆来源碳和氮对团聚体有机碳和氮的贡献比例均高于其他处理。微生物作为土壤团聚体形成过程以及土壤有机碳和氮循环过程中最活跃的生物因素,还需结合微生物的参与策略进一步研究秸秆来源碳和氮在团聚体中的转化和固定机制。

参考文献 (References):

- [1] 李海波, 韩晓增, 王凤. 长期施肥条件下土壤碳氮循环过程研究进展. 土壤通报, 2007, 38(2): 384-388.

- [2] 丁雪丽, 何红波, 白震, 解宏图, 李晓波, 郑立臣, 张明, 张旭东. 作物残体去向与利用及对土壤氮素转化的影响. 土壤通报, 2008, 39(6): 1454-1461.
- [3] O'Brien S L, Jastrow J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 61: 1-13.
- [4] Li S Y, Gu X, Zhuang J, An T T, Pei J B, Xie H T, Li H, Fu S F, Wang J K. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 199-206.
- [5] Chen N, Li X Y, Simunek J, Shi H B, Ding Z J, Zhang Y H. The effects of biodegradable and plastic film mulching on nitrogen uptake, distribution, and leaching in a drip-irrigated sandy field. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2020, 292: 106817.
- [6] Huo L, Pang H C, Zhao Y G, Wang J, Lu C, Li Y Y. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from Northwest China. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 286-293.
- [7] Niu L, Yan Y Y, Hou P, Bai W B, Zhao R L, Wang Y H, Li S K, Du T S, Zhao M, Song J Q, Zhou W B. Influence of plastic film mulching and planting density on yield, leaf anatomy, and root characteristics of maize on the Loess Plateau. *The Crop Journal*, 2020, 8(4): 548-564.
- [8] Wang Y P, Li X G, Fu T T, Wang L, Turner N C, Siddique K H M, Li F M. Multi-site assessment of the effects of plastic-film mulch on the soil organic carbon balance in semiarid areas of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 228-229: 42-51.
- [9] Hwang H Y, Cuello J, Kim S Y, Lee J G, Kim P J. Green manure application accelerates soil organic carbon stock loss under plastic film mulching. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, 116(2): 257-269.
- [10] 邬铃莉, 王玉杰, 王彬, 王云琦, 胡波, 谭锦. 干湿交替作用对西南地区黄壤团聚体稳定性的影响. 水土保持学报, 2017, 31(3): 317-321, 329-329.
- [11] Jin X X, An T T, Gall A R, Li S Y, Sun L J, Pei J B, Gao X D, He X, Fu S F, Ding X L, Wang J K. Long-term plastic film mulching and fertilization treatments changed the annual distribution of residual maize straw C in soil aggregates under field conditions: characterization by ^{13}C tracing. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(1): 169-178.
- [12] An T T, Schaeffer S, Li S Y, Fu S F, Pei J B, Li H, Zhuang J, Radosevich M, Wang J K. Carbon fluxes from plants to soil and dynamics of microbial immobilization under plastic film mulching and fertilizer application using ^{13}C pulse-labeling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 53-61.
- [13] 徐英德, 丁雪丽, 李双异, 孙良杰, 高晓丹, 谢柠桢, 金鑫鑫, 白树彬, 孙海岩, 汪景宽. 不同肥力棕壤全氮和微生物量氮对外源玉米残体氮的响应. 生态学报, 2017, 37(20): 6818-6826.
- [14] Schutter M E, Dick R P. Microbial community profiles and activities among aggregates of winter fallow and cover-cropped soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(1): 142-153.
- [15] Werner R A, Brand W A. Referencing strategies and techniques in stable isotope ratio analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2001, 15(7): 501-519.
- [16] Robinson D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends in Ecology and Evolution*, 2001, 16(3): 153-162.
- [17] Wang L, Li X G, Lv J T, Fu T T, Ma Q J, Song W Y, Wang Y P, Li F M. Continuous plastic-film mulching increases soil aggregation but decreases soil pH in semiarid areas of China. *Soil and Tillage Research*, 2017, 167: 46-53.
- [18] 刘秀, 司鹏飞, 张哲, 陈保青, 董雯怡, 严昌荣, 刘恩科. 地膜覆盖对北方旱地土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响. 生态学报, 2018, 38(21): 7870-7877.
- [19] Deneff K, Six J, Bossuyt H, Frey S D, Elliott E T, Merckx R, Paustian K. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(12-13): 1599-1611.
- [20] Sun D B, Li H G, Wang E L, He W Q, Hao W P, Yan C R, Li Y Z, Mei X R, Zhang Y Q, Sun Z X, Jia Z K, Zhou H P, Fan T L, Zhang X C, Liu Q, Wang F J, Zhang C C, Shen J B, Wang Q S, Zhang F S. An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency. *National Science Review*, 2020, 7(10): 1523-1526.
- [21] Jing X, Chen X, Fang J Y, Ji C J, Shen H H, Zheng C Y, Zhu B. Soil microbial carbon and nutrient constraints are driven more by climate and soil physicochemical properties than by nutrient addition in forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 141: 107657.
- [22] 孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔. 秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响. 环境科学, 2021, 42(1): 459-466.
- [23] Zhou H, Fang H, Hu C S, Mooney S J, Dong W X, Peng X H. Inorganic fertilization effects on the structure of a calcareous silt loam soil. *Agronomy Journal*, 2017, 109(6): 2871-2880.
- [24] 李小刚, 李凤民. 旱作地膜覆盖农田土壤有机碳平衡及氮循环特征. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4630-4638.
- [25] 王旭东, 陈鲜妮, 王彩霞, 田霄鸿, 吴发启. 农田不同肥力条件下玉米秸秆腐解效果. 农业工程学报, 2009, 25(10): 252-257.
- [26] Pei J B, Li H, Li S Y, An T T, Farmer J, Fu S F, Wang J K. Dynamics of maize carbon contribution to soil organic carbon in association with soil type and fertility level. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0120825.

- [27] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 温晓霞, 廖允成. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展. 土壤学报, 2021: 1-14. [2021-07-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210331.1357.008.html>.
- [28] Xu X R, Schaeffer S, Sun Z H, Zhang J M, An T T, Wang J K. Carbon stabilization in aggregate fractions responds to straw input levels under varied soil fertility levels. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199: 104593.
- [29] 安娜嫫, 马琨, 王明国, 马占旗. 玉米秸秆还田对土壤团聚体组成及其碳氮分布的影响. 西北农业学报, 2020, 29(5): 766-775.
- [30] Kopittke P M, Hernandez-Soriano M C, Dalal R C, Finn D, Menzies N W, Hoeschen C, Mueller C W. Nitrogen-rich microbial products provide new organo-mineral associations for the stabilization of soil organic matter. *Global Change Biology*, 2018, 24(4): 1762-1770.
- [31] Schipper L A, Sparling G P. Accumulation of soil organic C and change in C: N ratio after establishment of pastures on reverted scrubland in New Zealand. *Biogeochemistry*, 2011, 104(1/3): 49-58.
- [32] Li J W, Liu Y L, Hai X Y, Shang G Z P, Deng L. Dynamics of soil microbial C: N: P stoichiometry and its driving mechanisms following natural vegetation restoration after farmland abandonment. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133613.
- [33] Xu X, Li D J, Cheng X L, Ruan H H, Luo Y Q. Carbon: nitrogen stoichiometry following afforestation: a global synthesis. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19117.
- [34] Rong G H, Li W R, Zhu H S, Zhou J Y, Qiu L P, Ge N N, Wei X R, Shao M G. Dynamics of new- and old- organic carbon and nitrogen in bulk soils and aggregates following afforestation on farmland. *CATENA*, 2020, 195: 104838.
- [35] 曹良元, 张磊, 蒋先军, 苏海锋, 石杰, 李楠. 长期垄作免耕对不同大小土壤团聚体中几种氮素形态分布的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 824-830.
- [36] 魏圆云, 崔丽娟, 张曼胤, 潘旭. 土壤有机碳矿化激发效应的微生物机制研究进展. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1202-1211.
- [37] Paradelo R, Lerch T Z, Houot S, Dignac M F. Composting modifies the patterns of incorporation of OC and N from plant residues into soil aggregates. *Geoderma*, 2019, 353: 415-422.
- [38] Han G L, Tang Y, Liu M, Van Zwieten L, Yang X M, Yu C X, Wang H L, Song Z L. Carbon-nitrogen isotope coupling of soil organic matter in a karst region under land use change, Southwest China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 301: 107027.