

长期覆膜秸秆还田对土壤氮库和氮饱和和亏缺的影响^①

张方方^{1,2}, 薄其飞², 吴孔阳¹, 白 炬^{2,3}, 高 娜^{2,4}, 岳善超^{2,3}, 李世清^{2*}

(1 洛阳师范学院生命科学学院, 河南洛阳 471934; 2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

3 山西农业大学生态环境产业技术研究院, 太原 030024; 4 石家庄学院碳中和研究中心, 石家庄 050035)

摘 要: 基于黄土高原长达 7 年的春玉米田间定位试验, 选择覆膜尿素掺混控释肥处理(对照)和对照+秸秆还田(简称: 覆膜秸秆还田)两个处理, 探究了长期覆膜秸秆还田对表层(0~20 cm)和底层(20~40 和 40~60 cm)土壤氮库和氮饱和和亏缺的影响。结果表明: 与对照相比, 覆膜秸秆还田处理降低了表层土壤容重, 提高了各土层全氮含量和全氮储量, 显著提高了 2019 年和 2020 年表层土壤的氮库管理指数; 两年间表层土壤硝态氮含量分别显著提高了 173% 和 176%, 同时降低了表层土壤铵态氮含量; 且不同程度提高了表层土壤水溶性有机氮、热水浸提有机氮、颗粒有机氮含量, 略微提高了矿物结合态有机氮含量; 此外, 显著提高了两年间表层土壤细颗粒当前氮库, 显著降低了两年间表层土壤氮饱和和亏缺。综上, 覆膜秸秆还田是旱作农业区提高土壤质量和增强土壤氮库的可持续管理措施。

关键词: 覆膜秸秆还田; 无机氮组分; 有机氮组分; 氮库管理指数; 氮饱和和亏缺

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Effects of Long-term Film Mulching with Straw Return on Soil Nitrogen Pool and Nitrogen Saturation Deficit

ZHANG Fangfang^{1,2}, BO Qifei², WU Kongyang¹, BAI Ju^{2,3}, GAO Na^{2,4}, YUE Shanchao^{2,3}, LI Shiqing^{2*}

(1 College of Life Science, Luoyang Normal University, Luoyang, Henan 471934, China; 2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Institute of Eco-environment and Industrial Technology, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030024, China; 4 Carbon Neutrality Research Center, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: Based on a 7-year spring maize field experiment on the Loess Plateau, in which two treatments of urea mixed controlled release fertilizer under film mulching (the control, Cu) and CU+ straw return (CS) were established to investigate the effects of long-term film mulching with straw return on nitrogen (N) pools and N saturation deficits of topsoil (0–20 cm) and subsoil (20–40 and 40–60 cm). The results showed that compared with the control, CS decreased bulk density of topsoil, increased total nitrogen content and total nitrogen storage in each soil layer, significantly increased topsoil N pool management indexes in 2019 and 2020, and significantly increased topsoil nitrate N by 173% and 176% in 2019 and 2020, respectively, but decreased topsoil ammonium N. Compared with the control, CS increased the contents of water soluble organic N, hot water extracted organic N and particulate organic N to varying degrees and slightly increased mineral-associated organic N content in topsoil, and significantly increased current N pool in fine particles and significantly decreased N saturated deficit in topsoil in both years. In conclusion, film mulching with straw return is a sustainable management measure for improving soil quality and enhancing soil N pools in dryland agricultural areas.

Key words: Film mulching with straw return; Inorganic nitrogen fractions; Organic nitrogen fractions; Nitrogen pool management index; Nitrogen saturation deficit

①基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-52)、国家重点研发计划项目(2021YFD1900700)和河南省科技攻关计划项目(242102320148)资助。

* 通信作者(sqli@ms.iswc.ac.cn)

作者简介: 张方方(1989—), 男, 河南郑州人, 博士, 讲师, 主要从事农田土壤肥力调控研究。E-mail: setzhang@126.com

玉米(*Zea mays* L.)是重要的粮食作物。据联合国粮食及农业组织报告,预计到 2050 年全球玉米产量将增加 40%^[1],而更高的生产效率将产生巨量的秸秆。过去,秸秆常被就地焚烧,导致大气环境的严重污染。秸秆还田不仅可以减少秸秆焚烧,也可以为土壤提供丰富的有机质和其他营养元素^[2]。研究表明,与单秸秆还田或单施氮肥相比,秸秆还田配施氮肥更有利于提高作物产量和养分利用效率^[3]。秸秆还田配施氮肥能提高土壤氮库,改善耕层土壤质量^[4]。土壤氮库提升反过来也有助于减少氮肥投入,降低氮淋溶对环境的污染^[5]。因此,秸秆还田对于环境保护和土壤培肥具有重要意义。

土壤全氮(TN)背景值较高,变化幅度较小,在反映土壤氮库变化上不够敏感^[6]。因此,TN 中含量相对较少、活性较高的组分成为反映土壤氮库变化的重要指标^[7]。TN 由无机氮和有机氮组成,其中,无机氮主要是铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是以铵根离子形式存在的氮素,易与碱性物质发生反应导致氨挥发; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是作物吸收和利用氮的主要形式,具有高流动性^[8]。有机氮主要由活性组分和稳定组分构成。活性有机氮组分主要有水溶性有机氮(WSN)、热水浸提有机氮(HWN)和颗粒有机氮(PON)等,它们对管理措施变化的响应比 TN 更敏感,可以作为监测土壤氮库变化的早期指标^[7]。有机氮是复杂的异质化合物,同时测定多个活性有机氮组分可以更全面地评估管理措施引起的土壤氮库变化^[7]。矿物结合态有机氮(MAON)是有机氮库中相对稳定的组分,构成了土壤氮库的主体,在一定程度上决定了土壤供氮能力^[9]。碳库管理指数是评价不同管理措施对土壤碳库影响的重要指标^[10],后人在其基础上改进和引申出氮库管理指数(NPMI),来反映土壤供氮能力^[11-12]。因此,研究秸秆还田配施氮肥对 NPMI 的影响,有助于评价其提高土壤氮库的效果。此外,长期秸秆还田配施氮肥可能导致土壤氮饱和,掌握土壤氮饱和和亏缺有助于合理施用氮肥。

地膜覆盖是我国旱作农业区提高玉米产量的有效措施,但长期覆膜会导致表层土壤碳氮含量下降^[13],而秸秆还田能够有效补充土壤碳氮库。目前,关于覆膜秸秆还田对土壤碳库影响的研究较多^[14-15],但对氮库和氮饱和和亏缺影响的研究较少。因此,本研究提出“长期覆膜秸秆还田能够提高土壤氮库并减少氮饱和和亏缺”的研究假设,并基于 2014 年开始的田间定位试验,以黄土高原春玉米农田土壤为研究对象,对无机氮库和有机氮库进行了分库研究,明确了

长期覆膜秸秆还田下土壤 TN 及其组分和土壤氮饱和和亏缺的变化特征,以期为旱作农田土壤培肥提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间定位试验开始于 2014 年,在西北农林科技大学陕西长武黄土高原国家农业生态试验站(35°12'N, 107°40' E, 海拔 1 200 m)进行。该地区为暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量 584 mm,年均温 9.1℃,全年无霜期 171 d,地下水深达 50~80 m,属典型旱作农业区。地带性土壤为黑垆土。2019 年和 2020 年春玉米生育期月均气温和月均降雨量见表 1。2014 年 4 月试验开始前,表层(0~20 cm)土壤的基本理化性质为: pH 8.2,容重 1.30 g/cm³,有机碳 7.71 g/kg,全氮 1.10 g/kg,矿质氮 21.6 mg/kg,有效磷 21.5 mg/kg,速效钾 147.8 mg/kg^[16]。

表 1 2019 年和 2020 年春玉米生长期的月均降水量 (mm)

年份	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	合计
2019	49.6	66.0	131.2	191.2	95.6	118.6	652.2
2020	7.0	44.0	109.8	88.2	144.4	32.6	426.0

1.2 田间试验设计

本研究在 2019—2020 年开展,选择覆膜尿素掺混控释肥(CU,对照)和覆膜尿素掺混控释肥+秸秆还田(CS,长期覆膜秸秆还田)两个处理,每个处理 3 次重复,小区面积 56 m²(8×7 m)。供试氮肥为尿素和控释氮肥按纯氮量 2:1 掺混,磷肥为含 12% P₂O₅ 的过磷酸钙,钾肥为含 45% K₂O 的硫酸钾。氮磷钾肥均在播种前一次性施入,施用量分别为 N 250 kg/hm²、P 40 kg/hm² 和 K 80 kg/hm²。供试玉米品种为先玉 335,每年 4 月下旬播种,9 月下旬收获,播种深度 5 cm,密度 8 万株/hm²,全膜双垄沟法种植,周年覆膜,无补充灌溉。

1.3 土壤样品采集与分析

2019 年和 2020 年春玉米成熟期以五点取样法分别采集各处理表层(0~20 cm)和底层(20~40 和 40~60 cm)土样,混合均匀作为该土层土壤样品,带回实验室后过 2 mm 筛,人工去除石砾、根系等杂物,一部分土样 4℃ 保存备用,一部分土样自然风干后备用。另外,采用环刀法采集 2020 年春玉米收获期各处理不同土层原状土样,用于土壤容重测定。

土壤全氮(TN)含量采用凯氏定氮法测定^[17],TN 储量根据容重和 TN 含量计算^[13]。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

采用连续流动分析仪测定^[6]; 水溶性有机氮(WSN)和热水浸提有机氮(HWN)采用 Ghani 等^[18]报道的方法进行测定, WSN 与 HWN 之和为可浸提氮(ETN); 颗粒有机氮(PON)和矿物结合态有机氮(MAON)采用濮超等^[9]报道的方法进行测定。土壤 <20 μm 颗粒组分(即细颗粒组分, FPF)采用物理分筛法提取^[19]。土壤潜在氮饱和度(N_{sat})具体计算方法为^[19]: $N_{\text{sat}}=0.40+0.037 \times \text{FPF}$ 占比。测定 FPF 中氮含量即为细颗粒当前氮库(N_{cur})。土壤氮饱和和亏缺(N_{def})是 N_{sat} 与 N_{cur} 之差^[19]。

1.4 数据处理与统计分析

以 CU 处理不同土层的土壤作为该土层的参照土壤, 计算 CS 处理不同土层的 NPMI, 具体计算方法为: 氮库指数(NPI)=CS 处理 TN 含量/CU 处理 TN 含量^[12]; 氮库活度(NL)=ETN 含量/(TN 含量-ETN 含

量); 氮库活度指数(NLI)=CS 处理 NL/CU 处理 NL; $\text{NPMI}=\text{NPI} \times \text{NLI} \times 100$ 。

利用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 用 LSD 法进行多重比较, 以 $P<0.05$ 为差异显著; 采用 Pearson 相关系数法进行相关性分析。采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤容重、全氮含量和全氮储量

长期覆膜秸秆还田对不同土层土壤的容重、TN 含量和 TN 储量的影响见表 2。与 CU 处理相比, CS 处理降低了表层土壤容重, 但对底层土壤容重影响不大; CS 处理提高了各土层的 TN 含量, 但差异大多不显著; 同时, CS 处理提高了各土层的 TN 储量, 特别是显著提高了 20~40 cm 土层的 TN 储量。

表 2 覆膜秸秆还田对不同土层土壤容重、全氮含量和全氮储量的影响

土层深度 (cm)	处理	容重 (g/cm ³)	2019 年		2020 年	
			TN 含量(g/kg)	TN 储量(Mg/hm ²)	TN 含量(g/kg)	TN 储量(Mg/hm ²)
0~20	CU	1.40 ± 0.02 a	0.95 ± 0.03 b	2.67 ± 0.05 a	0.95 ± 0.05 a	2.65 ± 0.09 a
	CS	1.32 ± 0.08 a	1.12 ± 0.01 a	2.95 ± 0.16 a	1.05 ± 0.02 a	2.76 ± 0.21 a
20~40	CU	1.44 ± 0.04 a	0.70 ± 0.02 a	2.00 ± 0.07 b	0.70 ± 0 a	2.00 ± 0.06 b
	CS	1.50 ± 0.03 a	0.76 ± 0.01 a	2.27 ± 0.08 a	0.75 ± 0.03 a	2.23 ± 0.04 a
40~60	CU	1.43 ± 0.03 a	0.57 ± 0.05 a	1.64 ± 0.10 a	0.58 ± 0.02 a	1.67 ± 0.08 a
	CS	1.43 ± 0.01 a	0.65 ± 0.02 a	1.86 ± 0.06 a	0.63 ± 0.03 a	1.82 ± 0.10 a

注: 表中数值为平均值 ± 标准误, 同列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。

2.2 土壤氮组分

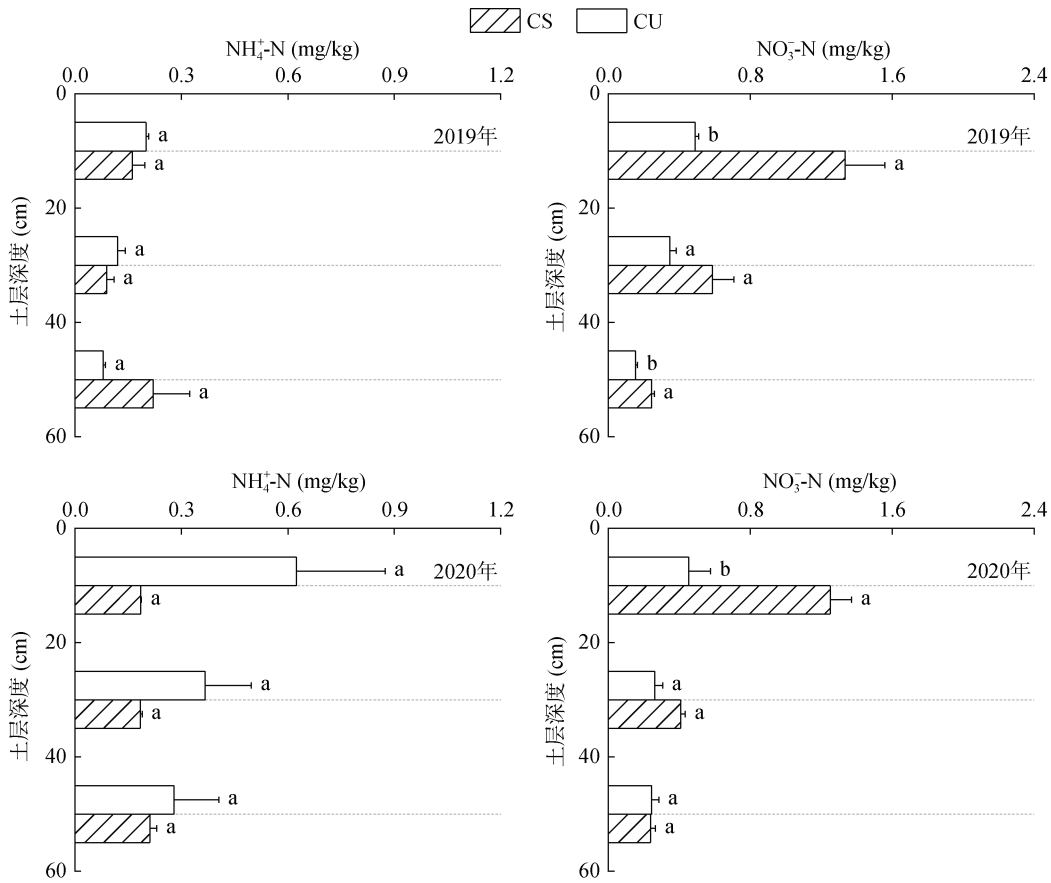
CU 和 CS 处理下不同土层的 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量见图 1。对于 NO_3^- -N, 与 CU 处理相比, CS 处理显著提高了 2019 年和 2020 年表层土壤 NO_3^- -N 含量; 在 20~40 cm 土层, 与 CU 处理相比, CS 处理提高了这两年土壤 NO_3^- -N 含量, 但差异不显著; 在 40~60 cm 土层, 年际间两处理 NO_3^- -N 含量变化趋势不同。对于 NH_4^+ -N, 在 0~20 和 20~40 cm 土层, 与 CU 处理相比, CS 处理降低了 2019 年和 2020 年土壤 NH_4^+ -N 含量; 在 40~60 cm 土层, 两处理 NH_4^+ -N 含量变化趋势不同。

CU 和 CS 处理不同土层的 WSN 和 HWN、PON 和 MAON 含量见图 2。对于 WSN, 与 CU 处理相比, CS 处理提高了 2019 年和 2020 年表层土壤 WSN 含量, 且在 2019 年差异达到显著水平; 两处理底层土壤 WSN 含量差异不显著。各土层土壤 HWN 的变化趋势与 WSN 基本一致, 与 CU 处理相比, CS 处理提高了 2019 年和 2020 年表层土壤 HWN 含量, 且在 2019 年差异达到显著水平; 除 2020 年 20~40 cm 土

层外, 两处理底层土壤 HWN 含量差异不显著。对于 PON, 与 CU 处理相比, CS 处理 2019 年表层土壤 PON 含量显著提高 41.9%, 2020 年表层土壤 PON 含量提高 26.6%, 但差异未达显著水平, 两处理底层土壤 PON 含量差异不显著。对于 MAON, 各土层两处理间差异均不显著。结果表明, 长期覆膜秸秆还田能够提高表层土壤 WSN 和 HWN 及 PON 含量。

2.3 土壤氮库管理指数

长期覆膜秸秆还田对不同土层 NPI、NLI 和 NPMI 的影响见表 3。对于 NPI, 与 CU 处理相比, CS 处理显著提高了 2019 年 0~20、20~40 cm 土层的 NPI, 显著提高了 2020 年 40~60 cm 土层的 NPI。对于 NLI, 与 CU 处理相比, CS 处理对 2019 年各土层 NLI 均无显著影响, 而显著提高了 2020 年各土层的 NLI。对于 NPMI, 与 CU 处理相比, CS 处理提高了两年中各土层的 NPMI, 且两年均在 0~20 cm 土层、2020 年在 20~40 和 40~60 cm 土层差异达显著水平。这表明长期覆膜秸秆还田能够显著提高表层土壤的 NPMI, 也能在一定程度上提高底层土壤的 NPMI。



(图中不同小写字母表示同一土层深度处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著; 下同)

图 1 CU 和 CS 处理不同土层 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量

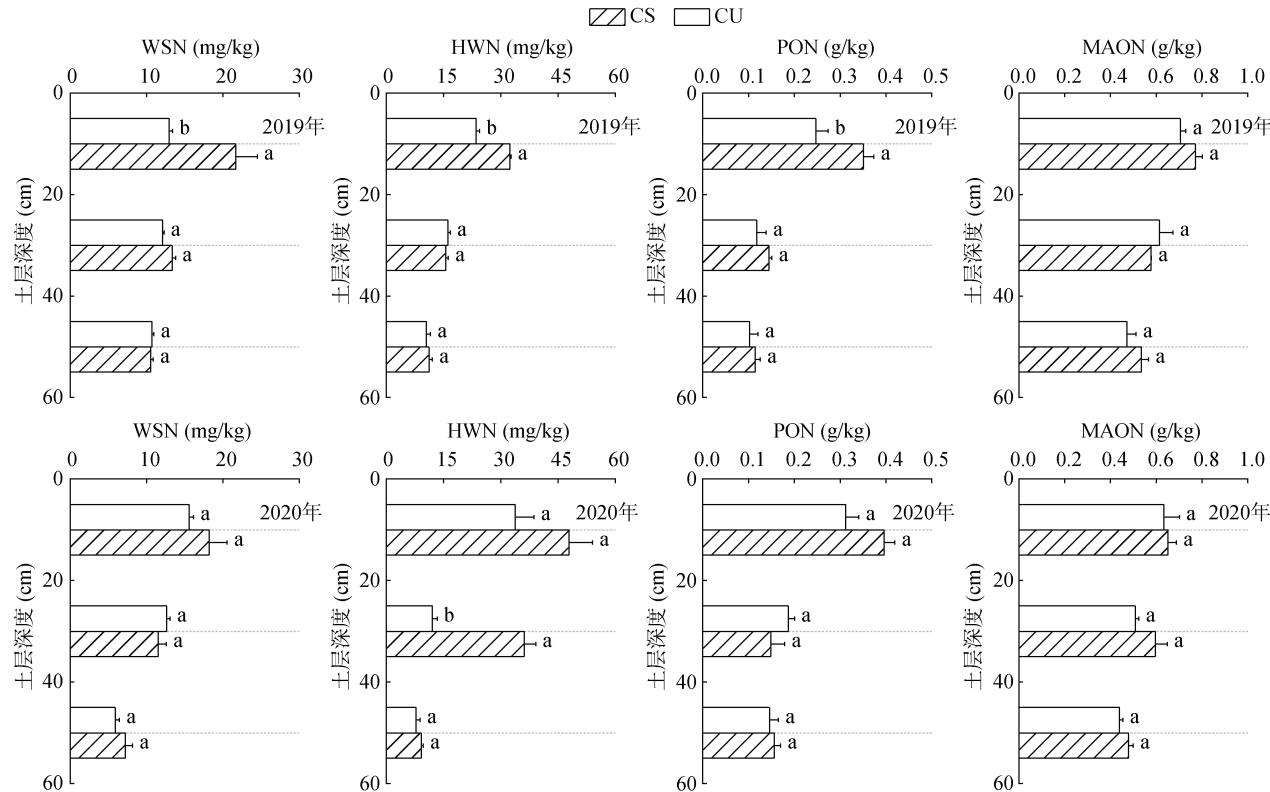


图 2 CU 和 CS 处理不同土层水溶性氮、热水浸提氮和颗粒态氮、矿物结合态氮含量

表 3 CU 和 CS 处理不同土层氮库指数、氮库活度指数和氮库管理指数

土层深度 (cm)	处理	2019 年			2020 年		
		NPI	NLI	NPMI	NPI	NLI	NPMI
0 ~ 20	CU	1.00 b	1.00 a	100 b	1.00 a	1.00 b	100 b
	CS	1.18 ± 0.03 a	1.29 ± 0.16 a	151 ± 14.56 a	1.11 ± 0.08 a	1.22 ± 0.02 a	136 ± 11.2 a
20 ~ 40	CU	1.00 b	1.00 a	100 a	1.00 a	1.00 b	100 b
	CS	1.09 ± 0.01 a	0.94 ± 0.07 a	102 ± 6.56 a	1.07 ± 0.04 a	1.86 ± 0.11 a	199 ± 9.15 a
40 ~ 60	CU	1.00 a	1.00 a	100 a	1.00 b	1.00 b	100 b
	CS	1.15 ± 0.10 a	0.91 ± 0.11 a	102 ± 4.86 a	1.09 ± 0.02 a	1.12 ± 0.02 a	122 ± 1.91 a

2.4 土壤氮饱和和亏缺

长期覆膜秸秆还田对不同土层 FPF、 N_{sat} 、 N_{cur} 和 N_{def} 的影响见图 3。对于 FPF 和 N_{sat} ，两处理在各土层均无显著差异。对于 N_{cur} ，在 0 ~ 20 cm 土层，与 CU 处理相比，CS 处理显著提高了两年的 N_{cur} ；在 20 ~ 40 cm 土层，CS 处理仅在 2019 年显著降低了 N_{def} ；在 40 ~ 60 cm 土层，两处理的 N_{def} 无显著差异。可见，长期覆膜秸秆还田能够显著提高表层土壤的 N_{cur} 和显著降低表层土壤的 N_{def} 。

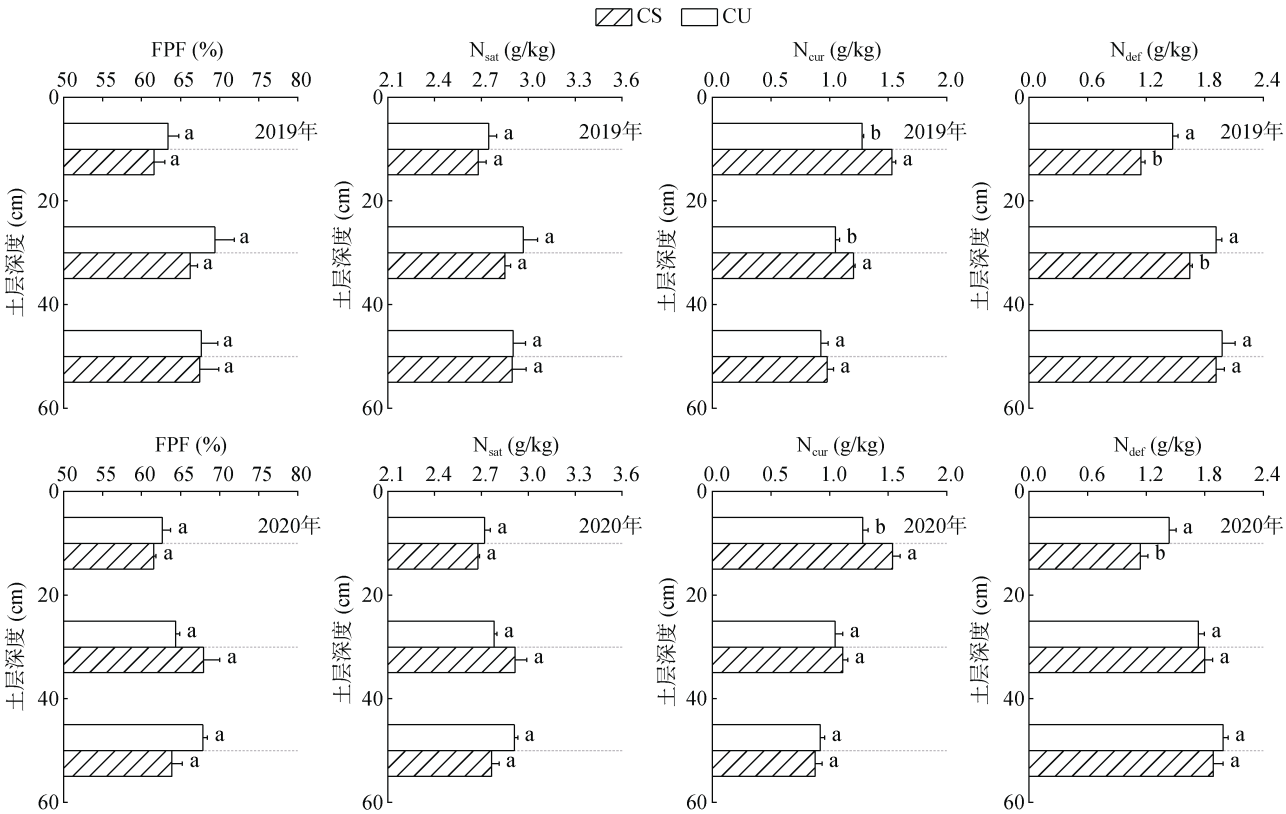
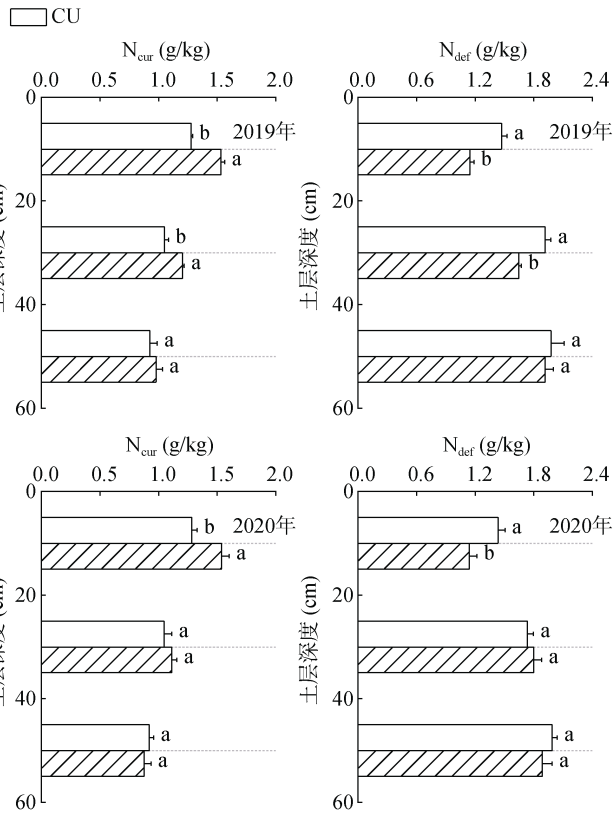


图 3 CU 和 CS 处理不同土层细颗粒组分占比、潜在氮饱和度、细颗粒当前氮库及氮饱和和亏缺

2.5 相关性分析

由图 4 可知，TN 与 NO_3^- -N、WSN、MAON、NPI、NLI、NPMI、 N_{cur} 和 N_{def} 均显著正相关；除 TN 外，NPMI 还与 NO_3^- -N、WSN、NPI、NLI、 N_{cur} 和 N_{def} 显著相关； N_{def} 与除 BD、 NH_4^+ -N 和 MAON 外的各指标均显著相关。这表明， NO_3^- -N、WSN 和 MAON 是反映表层土壤氮库变化的重要组分，NPMI 可有效

反映表层土壤氮库变化，表层土壤 N_{def} 的变化主要来自活性氮库。

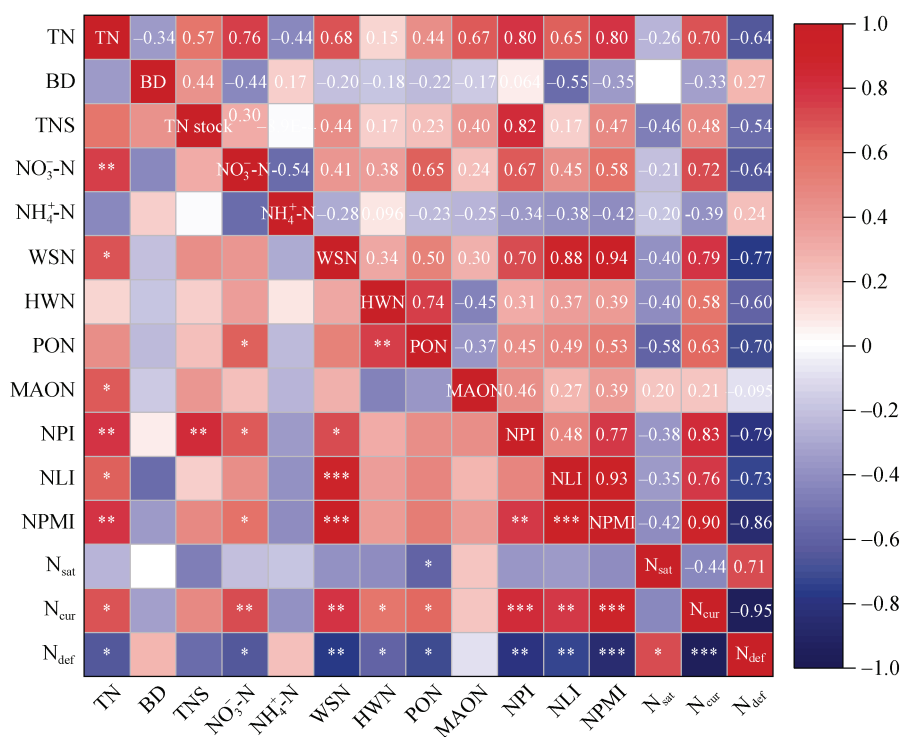


反映表层土壤氮库变化，表层土壤 N_{def} 的变化主要来自活性氮库。

3 讨论

3.1 长期覆膜秸秆还田对土壤全氮和氮库管理指数的影响

土壤 TN 含量是评价农田土壤质量的重要指标



(*、**、***分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 、 $P < 0.001$ 水平显著相关; TNS 为全氮储量)

图 4 CU 和 CS 处理表层土壤全氮及氮组分与氮库管理指数和氮饱和与欠缺的相关矩阵图

之一。已有研究表明,长期覆膜增加了表层土壤有机质消耗^[20]。秸秆还田可以通过提高土壤有机质回归来实现土壤碳氮供应和损失平衡^[21]。本研究中,与 CU 处理相比,CS 处理提高了不同土层的 TN 含量和 TN 储量,显著提高了 20 ~ 40 cm 土层的 TN 储量。这表明秸秆还田可以弥补长期覆膜造成的土壤氮库矿化损失,而连年翻耕形成的犁底层增加了 20 ~ 40 cm 土层的容重,导致该土层 TN 储量显著提高^[22]。与 2019 年相比,CU 和 CS 处理 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层的 TN 含量在 2020 年有所降低,可能是 2020 年春玉米生育期降水较少对土壤有机质有激发效应,加剧了有机氮的矿化^[22]。本研究中,与 CU 处理相比,CS 处理显著提高了表层土壤的 NPMI,这与王开悦等^[12]的研究结果一致。与 2020 年相比,CS 处理仅在 2019 年显著提高了表层土壤的 NPMI,这可能是两年间降水量不同造成的。相关分析显示,NPMI 与 TN、NO₃-N 和 WSN 显著正相关,这在一定程度上验证了 NPMI 是综合反映土壤氮库数量和质量变化的重要指标^[12]。

3.2 长期覆膜秸秆还田对土壤氮组分的影响

长期覆膜秸秆还田对不同氮组分的影响有较大差异。无机氮是作物能够直接吸收利用的氮素,从无机氮组分来看,本研究中,与 CU 处理相比,CS 处

理在两年中均显著提高了表层土壤的 NO₃-N 含量。这可能有两方面原因:一是 CS 处理秸秆中的有机氮矿化补充了部分 NO₃-N;二是有机碳占秸秆的大部分,覆膜提高了微生物活性,可能诱导微生物为分解秸秆而促进缓释氮肥中氮的释放^[23]。有机氮是土壤氮素的主要存在形式,大多数地区表层土壤 90% 以上的氮以有机形式与土壤有机碳耦合存在^[24]。本研究中,与 CU 处理相比,CS 处理在两年中表层土壤的 WSN 和 HWN 含量均有所提高。郭伟等^[25]研究结果也显示,可溶性有机氮是秸秆还田配施化肥条件下影响作物产量的关键土壤性质之一。这可能是因为秸秆中含有大量的非结构性物质、半纤维素和纤维素,进入土壤后可以迅速释放大量的碳,并诱发溶解性碳氮的释放^[26-27]。本研究中,与 CU 处理相比,CS 处理仅在 2019 年显著提高表层土壤的 WSN 和 HWN,这显然与两年间的降水量变化密切相关。

本研究中,与 CU 处理相比,CS 处理在两年中均提高了表层土壤的 PON 和 MAON 含量。这是由于秸秆还田提高了氮的回归量,并促进了缓释肥中氮的释放。但也有研究表明,随着管理措施年限的增加,表层土壤有机氮含量总体不变,但活性有机氮组分在有机氮中的比例下降,即活性组分在向稳定态组分转化^[28]。作为构成土壤氮库的主要组分,MAON 很可

能是有机氮矿化的主体^[29]。相关分析显示, MAON 与 TN 显著正相关, 可能是由于 MAON 对 TN 的提高有直接贡献。此外, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、WSN 也与 TN 显著正相关。总体上, 土壤氮库构成复杂且各组分活性相异, 不同管理措施下特异的土壤环境会影响土壤有机质的质量, 进而影响土壤氮素在各组分间的分配。

3.3 长期覆膜秸秆还田对土壤氮饱和亏缺的影响

本研究中, 与 CU 处理相比, CS 处理在两年中均提高了表层土壤的 FPF 占比, 这与江恒^[30]的研究结果相同。这是由于秸秆还田能够改善土壤结构, 降低表层土壤容重, 提高表层土壤大团聚体比例, 降低表层土壤粉黏粒比例^[30]。由于 N_{sat} 是根据 FPF 占比进行计算的, 这也导致 CS 处理相对于 CU 处理在两年中表层土壤的 N_{sat} 均有一定程度的下降。本研究中, 与 CU 处理相比, CS 处理在两年中均显著提高了表层土壤的 N_{cur} , 原因可能在于两方面: 一是 FPF 具有很大的比表面积和电荷密度等特性, 能够较强地吸附土壤有机质^[31]; 二是 FPF 土壤孔隙细小且易充水导致通气不畅, 好气性微生物活动受到抑制, 土壤有机质分解缓慢^[32]。因此, FPF 通常被认为是土壤有机质含量较高的组分。但这会导致理论上过高的测算 N_{sat} 和过低的测算 N_{def} 。本研究中, 与 CU 处理相比, CS 处理在两年中表层土壤 N_{def} 分别显著降低 21.9% 和 20.5%, 原因有两方面: 一是秸秆还田改善了土壤结构, 降低了 FPF 占比, 进而导致 N_{sat} 的降低; 二是还田秸秆中含有的氮素可以补充部分土壤氮素损失。本研究中, 连续秸秆还田 6 年和 7 年后, CS 处理表层土壤的 N_{cur} 分别达到 N_{sat} 的 42.8% 和 48.6%, 即每年土壤氮饱和度提高约 5.8%, 这表明覆膜秸秆还田不会在短期内导致土壤氮饱和, 达到土壤氮饱和至少需要 16 年。

4 结论

长期覆膜秸秆还田能够降低表层土壤容重, 提高不同土层的 TN 含量和 TN 储量, 显著提高表层土壤的 NPMI, 有效改善表层土壤氮库。长期覆膜秸秆还田在不同程度上提高表层土壤除 $\text{NH}_4\text{-N}$ 外的各种氮组分, 降低表层土壤潜在氮饱和度, 并显著降低表层土壤的氮饱和亏缺。因此, 覆膜秸秆还田是提高土壤质量和增加土壤氮养分的长期可持续管理措施。

参考文献:

[1] Dorin B, Caron P. How to feed the world in 2050[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009.

[2] 刘淑军, 李冬初, 黄晶, 等. 近 30 年来我国小麦和玉米秸秆资源时空变化特征及还田减肥潜力[J]. 中国农业科学, 2023, 56(16): 3140–3155.

[3] Meng X P, Guo Z Y, Yang X N, et al. Straw incorporation helps inhibit nitrogen leaching in maize season to increase yield and efficiency in the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 211: 105006.

[4] 刘艳, 叶鑫, 包红静, 等. 秸秆还田配施化肥对春玉米耕层土壤理化性质及产量的影响[J]. 土壤, 2023, 55(2): 254–261.

[5] 张斯梅, 段增强, 顾克军, 等. 稻秸还田下减量化施氮对小麦产量、养分吸收及土壤理化性质的影响[J]. 土壤, 2023, 55(3): 537–543.

[6] 张方方, 马宁博, 岳善超, 等. 基于不同方法的汉中盆地稻麦轮作土壤供氮能力评价[J]. 中国农业科学, 2020, 53(19): 3996–4009.

[7] Haynes R. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview[J]. Advances in Agronomy, 2005, 85: 221–268.

[8] Andrews M, Raven J A, Lea P J. Do plants need nitrate? The mechanisms by which nitrogen form affects plants[J]. Annals of Applied Biology, 2013, 163(2): 174–199.

[9] 濮超, 刘鹏, 阚正荣, 等. 耕作方式及秸秆还田对华北平原土壤全氮及其组分的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 160–166.

[10] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459.

[11] 焦欢, 李廷亮, 高继伟, 等. 培肥措施对复垦土壤轻重组有机碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 208–213, 221.

[12] 王开悦, 廖育林, 鲁艳红, 等. 超级稻田碳氮库管理指数在等养分不同有机物料处理下的动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1758–1767.

[13] Zhang F F, Wei Y N, Bo Q F, et al. Long-term film mulching with manure amendment increases crop yield and water productivity but decreases the soil carbon and nitrogen sequestration potential in semiarid farmland[J]. Agricultural Water Management, 2022, 273: 107909.

[14] Li Y, Song D P, Dang P F, et al. Combined ditch buried straw return technology in a ridge–furrow plastic film mulch system: Implications for crop yield and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104596.

[15] 王钰皓, 庞津雯, 卫婷, 等. 旱作农田覆膜和秸秆碳投入对土壤团聚特性及作物产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 272–284.

[16] 张方方. 旱作春玉米农田土壤碳氮库对覆盖及有机物料配施的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[18] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining

- impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9): 1231–1243.
- [19] Wiesmeier M, Hübner R, Spörlein P, et al. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 653–665.
- [20] Zhang F F, Li S Q, Yue S C, et al. The effect of long-term soil surface mulching on SOC fractions and the carbon management index in a semiarid agroecosystem[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 216: 105233.
- [21] Wingeyer A B, Walters D T, Drijber R A, et al. Fall conservation deep tillage stabilizes maize residues into soil organic matter[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(6): 2154–2163.
- [22] 钱锐. 秸秆还田对覆膜春玉米农田土壤有机碳库及温室气体排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [23] Ventrella D, Stellacci A M, Castrignanò A, et al. Effects of crop residue management on winter durum wheat productivity in a long term experiment in Southern Italy[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 77: 188–198.
- [24] Nieder R, Benbi D K. Carbon and nitrogen in the terrestrial environment[M]. Cham: Springer Netherlands, 2008.
- [25] 郭伟, 李丹丹, 徐基胜, 等. 秸秆与有机无机肥配施对不同质地潮土土壤质量和小麦产量的影响[J]. *土壤学报*, 2024, 61(5): 1360–1373.
- [26] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, et al. Formation of soil organic matter *via* biochemical and physical pathways of litter mass loss[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 776–779.
- [27] De Troyer I, Amery F, Van Moorleghe C, et al. Tracing the source and fate of dissolved organic matter in soil after incorporation of a ^{13}C labelled residue: A batch incubation study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(3): 513–519.
- [28] Spargo J T, Cavigelli M A, Alley M M, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen fractions with duration of No-tillage management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(5): 1624–1633.
- [29] 张方方, 宋启龙, 高娜, 等. 长期覆盖对黄土高原春玉米产量、土壤碳氮组分和碳氮库相关指数的影响[J]. *中国农业科学*, 2025, 58(3): 507–519.
- [30] 江恒. 有机物输入量对黑土结构性质及其季节性变化的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [31] Tiessen H, Stewart J W B. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter: II. cultivation effects on organic matter composition in size fractions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(3): 509–514.
- [32] 刘树林, 王涛, 屈建军. 浑善达克沙地土地沙漠化过程中土壤粒度与养分变化研究[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 611–616.