

秸秆还田方式配施氮肥对玉米秸秆腐解特征及土壤有机碳的影响

李泽毅^{1, 2}, 马玉洁¹, 付鑫^{1*}, 彭正萍^{1, 2}, 李旭¹

(1. 河北农业大学国土资源学院/资源与环境科学学院, 河北 保定 071001;

2. 华北作物改良与调控国家重点实验室, 河北 保定 071001)

摘要: 为探究华北平原麦玉轮作区不同玉米秸秆还田方式和氮肥管理下秸秆腐解及养分释放和土壤有机碳的变化规律, 以玉米秸秆为研究对象, 通过连续两年的田间定位试验, 采用尼龙网袋法分析秸秆旋耕还田 (RT) 和深翻还田 (DT) 两种秸秆还田方式和 180 kg/hm² (N1)、240 kg/hm² (N2) 和 300 kg/hm² (N3) 3 个施氮水平双因素下秸秆腐解和土壤有机碳的变化特征。结果表明: 各处理秸秆腐解速率均表现为先快后慢、最后趋于停滞的变化特征, 秸秆还田方式和施氮量均显著影响秸秆腐解特征, 其中 DT 处理秸秆腐解率显著高于 RT 处理, 提高幅度为 4.36% ~ 6.25%, 在秸秆腐解前期秸秆腐解率随施氮量的增加而增加, 但生育后期各施氮处理间无显著差异; 秸秆还田方式和施氮量两因素对秸秆碳累积释放量有交互作用, RT 处理下 N1 更有利于秸秆碳释放, 但 DT 处理下 N2 更有利于秸秆碳释放; 秸秆还田方式和施氮量显著影响土壤有机碳含量, 且具有交互效应, 0 ~ 20 cm 土层 RT 处理土壤有机碳含量在小麦生育期均显著高于 DT 处理, 且随施氮量的提高土壤有机碳呈上升趋势, 在 20 ~ 40 cm 土层表现相反。秸秆还田方式和施氮量对小麦产量及其构成因素具有显著影响, 且对小麦产量具有交互效应, DT 处理小麦产量较 RT 处理两年分别提高 4.26% 和 3.41%, 在 RT 处理下 N1 施氮量有利于小麦产量的提高, 但在 DT 处理下 N2 和 N3 处理更有利于小麦产量的提高。因此, 秸秆深翻还田配施氮 240 kg/hm² 的农田管理措施可以促进秸秆腐解转化及表层和亚表层土壤有机碳固定, 并提高小麦产量, 而秸秆旋耕还田配施氮 180 kg/hm² 时, 更有利于表层土壤有机碳积累, 并提高小麦产量。

关键词: 还田方式; 施氮量; 秸秆腐解; 土壤有机碳; 小麦产量

作为传统的农业大国, 中国每年产生的农作物秸秆种类丰富, 各类农作物秸秆的总产量约占世界秸秆产量的 25%, 秸秆还田是兼顾经济效益与环境效益的利用方式^[1-2]。秸秆还田是秸秆资源利用的重要途径, 也是农田土壤培肥的重要举措, 对实现农业可持续发展具有重要意义, 因此近几十年来在华北麦玉轮作区得到广泛推广^[3]。大量研究结果表明, 秸秆还田并腐解后可显著提高农田土壤有机碳 (SOC) 含量, 改善土壤物理结构, 提高作物产量等^[4-5]。

秸秆还田后的腐解过程及土壤碳动态变化受到秸秆自身组分、土壤性质、耕作方式、施肥情况等

因素的影响^[6-9]。庞党伟等^[10]在山东进行了不同还田方式秸秆腐解试验, 结果表明与旋耕还田相比, 深耕还田促进玉米秸秆的腐解, 从而提高耕层土壤的有机质含量。田平等^[8]在东北棕壤土区开展土壤耕作和秸秆还田试验, 结果表明旋耕秸秆还田处理秸秆腐解率显著高于翻耕秸秆还田。但邹文秀等^[11]在东北地区进行了不同还田方式秸秆腐解试验, 发现深翻秸秆还田较旋耕秸秆还田更有利于土壤碳的固存。Latifmanesh 等^[12]在华北平原玉米小麦两熟地区研究不同还田深度对秸秆腐解的影响, 结果表明玉米秸秆在还田 0 ~ 10 cm 处理下比还田 10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 处理含有更高的秸秆腐解率。由此可以看出, 在不同地区秸秆还田方式对秸秆腐解特征与碳固定的影响存在较大差异。

秸秆还田后可释放大量氮素, 具有一定的节肥作用, 但是氮肥施用量是影响秸秆腐解及秸秆碳在土壤中固定的主要因素之一, 因此合理配施氮肥是提高秸秆还田碳固定作用效应的关键。已有研究发

收稿日期: 2023-11-29; 录用日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42207404); 河北省重点研发计划项目 (21326402D); 国家重点研发计划项目 (2022YFD1901300)。

作者简介: 李泽毅 (1999-), 硕士研究生, 主要从事秸秆碳在土壤中周转研究。E-mail: lzy130503@163.com。

通讯作者: 付鑫, E-mail: fuxinxin12152@163.com。

现，可通过氮肥的投入调节秸秆还田后土壤微生物活性，促进还田秸秆的腐解和养分释放，同时提高土壤养分含量^[13]。因此，探究不同玉米秸秆还田方式和氮肥管理对秸秆腐解及养分释放的变化规律对华北地区秸秆的资源化高效利用具有重要意义。目前，多数研究集中在秸秆还田或施肥量的单一因素对秸秆腐解及土壤养分的相关研究，在华北地区关于还田方式与施氮量双因素下的玉米秸秆腐解及碳释放特征和土壤有机碳变化规律的研究较少。

因此，本研究拟通过田间定位试验，研究连续2年不同玉米秸秆还田方式与施氮量对秸秆腐解及碳释放特征、土壤有机碳变化规律，及其对小麦生长及产量的影响，为华北地区合理利用玉米秸秆资源、提高土壤碳库容量和小麦产量提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于2021年10月至2023年6月在河北省邢台市宁晋县贾家口镇白木村进行。研究地属温带大陆性气候，年平均气温12.7℃，无霜期199 d，年均日照时间2538.1 h，年均降水量449.3 mm，试验期间日平均气温和降水量见图1。供试土壤属轻壤质潮褐土，土壤基础理化性状见表1。

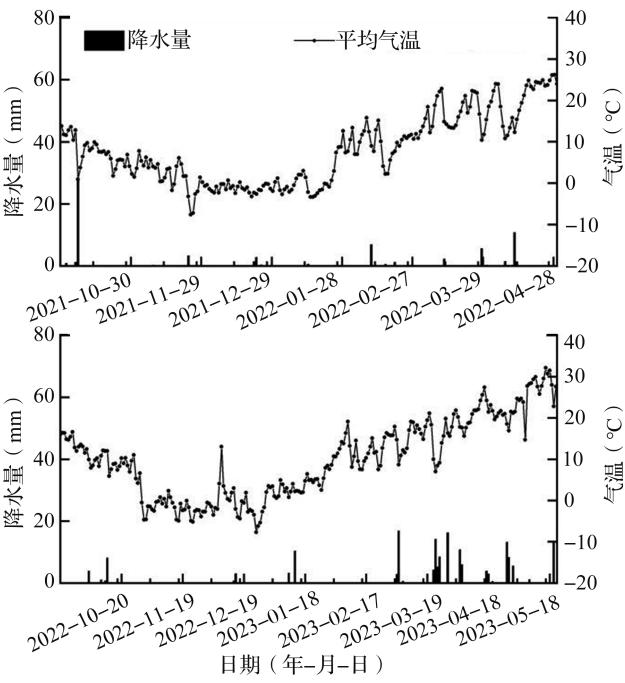


图1 试验区2021—2022和2022—2023年小麦生长期日均温和降水量

表1 供试土壤基础理化性状

土层 (cm)	pH	容重 (g/cm ³)	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
0 ~ 20	8.14	1.41	20.80	1.54	6.49	119.22
20 ~ 40	8.45	1.45	10.78	0.82	5.33	76.45

1.2 试验设计

本试验采用还田方式和施氮量双因素裂区设计，还田方式为主因素，包括两种还田方式，即秸秆旋耕还田（RT）和深翻还田（DT）；施氮量为副因素，设3个施氮水平，即180 kg/hm²（N1）、240 kg/hm²（N2）和300 kg/hm²（N3），见表2。试验共6个处理，每个处理重复3次，18个试验小区，每个小区60 m²。供试肥料为尿素（N 46%）、过磷酸钙（P₂O₅ 16%）、氯化钾（K₂O 60%），除氮肥施用量不同外，磷肥和钾肥施用水平相同，分别为P₂O₅ 135 kg/hm²和K₂O 105 kg/hm²。磷肥和钾肥采用一次性底肥施入，氮肥基追比为5:5，其他田间管理措施同农户常规管理。供试小麦品种为“济麦22”，小麦于10月份播种，次年6月份收获，2021—2022年和2022—2023年小麦生长周期分别为220和230 d。2021—2022年和2022—2023年小麦生育期降水量分别为70和147.5 mm，两年小麦季积温分别为696.4和719.7℃，两年小麦季累计灌水量均为150 m³/hm²。

表2 试验处理描述

处理	还田 方式	施氮量 (N kg/hm ²)	具体操作
RTN1	旋耕 (RT)	180	旋耕还田处理为玉米收获后粉碎秸秆两遍，旋耕两遍，然后播种，耕深15 cm
RTN2		240	
RTN3		300	
DTN1	深翻 (DT)	180	深翻还田处理为玉米收获后粉碎秸秆两遍，翻耕一遍，然后播种，耕深30 cm
DTN2		240	
DTN3		300	

玉米收获后，采集玉米秸秆，75℃烘干。取20.0 g烘干秸秆放入0.15 mm的尼龙网袋（14.0 cm×25.0 cm），随后将网袋密封^[14]。将封口的尼龙网袋于2021年10月25日和2022年10月10日各小区埋设12个玉米秸秆网袋于小区中一行，秸秆旋耕还田各处理埋设深度为15 cm，秸秆深翻还田各处理埋设深度为30 cm。并于每个埋好的尼龙网袋上方放入插地牌做好标记，以便后期取样。

1.3 样品的采集及测定

分别于 2021—2022 年玉米秸秆翻压后第 10、25、35、50、70、100、120、140、170、190、200、220 d 和 2022—2023 年玉米秸秆翻压后第 10、20、40、60、80、100、120、140、170、190、200、220 d 采集尼龙网袋, 进行秸秆重量及碳含量测定。在采集尼龙网袋的同时, 于秸秆翻压后第 20、60、120 和 220 d 采集尼龙网袋附近 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层土壤样品。

尼龙网袋内秸秆样品采集后去除表面泥土与杂物, 洗净后 70 °C 下烘 48 h 恒重, 测定腐解率及 2021—2022 年玉米秸秆翻压后第 25、100、170、220 d 和 2022—2023 年玉米秸秆翻压后第 10、100、170、220 d 秸秆碳释放率。0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层土壤样品混合均匀带回实验室风干后研磨, 过 0.15 mm 筛备用。土壤和秸秆有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定。

在小麦收获期, 每处理选取 3 组, 每组割取 2 m × 6 行小麦, 将其全部脱粒, 测定籽粒重及其含水量, 按面积折算为含水量 12.5% 的小麦籽粒产量。同时在各小区地上部割取 1 m × 2 行的小麦,

数出有效穗数, 从中再选取 20 穗, 数出平均穗粒数、测定千粒重, 千粒重测定取 3 次平均值。

1.4 数据处理

采用 Excel 2020 对试验数据进行初步处理, 采用 SPSS 20.0 进行试验数据的方差分析与差异显著性检验 (LSD 法), 使用 Origin 2022 进行相关图形的绘制。

2 结果与分析

2.1 秸秆腐解特征

不同秸秆还田方式与施氮量下玉米秸秆腐解动态结果见图 2。由图 2 可知, 2021—2022 年和 2022—2023 年秸秆腐解规律表现为先快速腐解—随后缓慢腐解—最后腐解停滞的特点。其中秸秆还田至 20 ~ 25 d 是秸秆还田快速腐解期, 各处理秸秆累积腐解率达 40% 左右, 秸秆腐解速率均在 0.2 g/d 以上 (图 3); 在秸秆腐解 30 至 140 d, 各处理秸秆腐解速率基本呈逐渐下降的变化趋势; 最后秸秆腐解停滞期秸秆腐解速率均低于 0.03 g/d, 至 220 d 各处理秸秆累积腐解率达 65.53% ~ 77.17%。

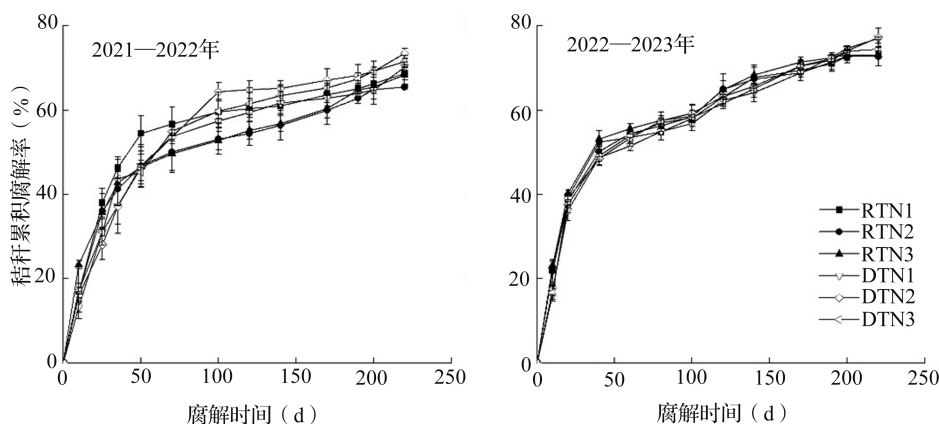


图 2 秸秆还田方式和施氮量条件下秸秆累积腐解率

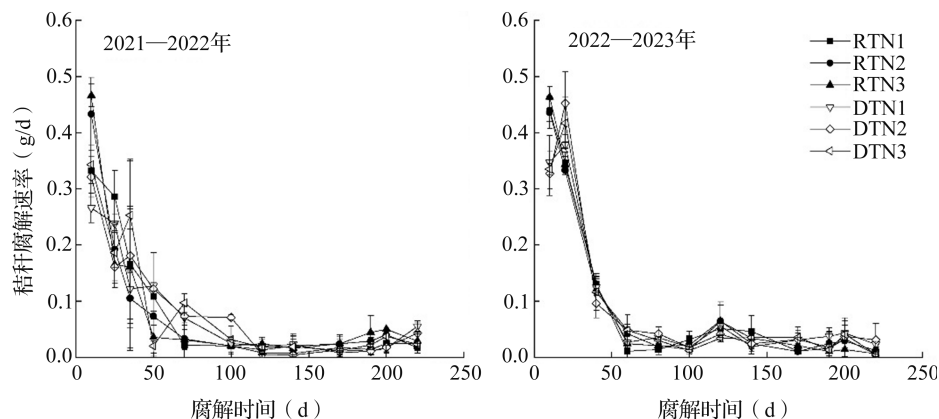


图 3 秸秆还田方式和施氮量条件下秸秆腐解速率

秸秆还田方式和施氮量对秸秆累积腐解率存在显著影响，两因素间无交互性作用。在 2022—2023 年和 2021—2022 年，秸秆还田方式对秸秆累积腐解率的影响作用随小麦生育期的不同表现出明显差异，其中在玉米秸秆腐解前期（小麦越冬前）RT 各处理秸秆累积腐解率显著高于 DT 处理，但在秸秆腐解后期（开花期后），DT 处理显著高于 RT 处理。玉米秸秆还田 220 d 时，2021—2022 年和 2022—2023 年各处理秸秆累积腐解率分别达 65.53% ~ 73.45% 和 72.77% ~ 77.12%，其中 DT 处理秸秆累积腐解率较 RT 处理分别显著提高 6.25% 和 4.36%。在两年秸秆腐解过程中，在秸秆腐解 10 d 时，不同施氮量处理秸秆累积腐解率有显著差异，随施氮量的提高，秸秆累积腐解率显著提高，N3 处理较 N1 和 N2 提高 4.45% ~ 35.26% ($P<0.05$)，但随小麦生育进程的推进，各施氮处理间无显著差异。

2.2 秸秆碳释放率

秸秆碳释放率与秸秆腐解率变化趋势相同

（表 3）。2021—2022 年和 2022—2023 年在腐解前期和后期，秸秆还田方式对秸秆碳释放率具有显著影响，而施氮量对秸秆碳释放率影响不显著，还田方式和施氮量的交互效应对秸秆碳释放率的影响在腐解第 220 d 较为显著。在两个试验年，秸秆腐解前期（2021—2022 年腐解到第 25 d 以及 2022—2023 年腐解到第 10 d）RT 处理秸秆碳释放率明显高于 DT 处理，分别提高 11.84% 和 25.49% ($P<0.05$)；2022—2023 年腐解到第 10 d，在 DT 处理下 N3 处理秸秆碳释放率较 N2 处理显著提高。在 2021—2022 年，秸秆腐解到第 100 和 170 d 时均表现为 DT 处理秸秆碳释放率明显高于 RT 处理，而在 2022—2023 年腐解至 100 和 170 d 时各处理秸秆碳释放率未表现出明显差异。在 2021—2022 年和 2022—2023 年腐解到第 220 d 时，2 种还田方式下，DT 处理秸秆碳释放率明显高于 RT 处理，显著提高 1.29% 和 3.24% ($P<0.05$)；此时，在 DT 方式下 N2 处理秸秆碳释放率显著高于 N1、N3 处理，而在 RT 方式下 N1 处理秸秆碳释放率显著高于 N2、N3 处理。

表 3 秸秆还田方式和施氮量对秸秆碳释放率的影响 (%)

秸秆还田方式	施氮量	2021—2022 年				2022—2023 年			
		25 d	100 d	170 d	220 d	10 d	100 d	170 d	220 d
RT	N1	50.65a	68.28a	73.98a	80.18a	28.40ab	65.80a	79.08a	80.56a
	N2	50.36a	63.25b	70.82a	76.50b	25.52b	65.70a	76.25b	77.25b
	N3	49.23a	62.24b	70.13a	77.54ab	29.08a	64.26a	77.66ab	78.97ab
DT	N1	44.66a	66.24b	72.45b	77.18b	21.09ab	66.33a	78.00a	81.07ab
	N2	44.79a	72.35a	75.84a	81.35a	20.54b	65.18ab	77.67a	82.24a
	N3	44.88a	69.14b	74.87ab	78.71b	24.52a	63.78b	78.05a	80.15b
显著性分析									
秸秆还田方式 (T)		**	***	*	ns	***	ns	ns	**
施氮量 (N)		ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
T × N		ns	***	*	***	ns	ns	ns	**

注：不同小写字母表示同一秸秆还田方式下不同氮肥管理间差异显著 ($P<0.05$)，*** 表示在 0.001 水平差异显著；** 表示在 0.01 水平差异显著；* 表示在 0.05 水平差异显著；ns 表示差异不显著。下同。

2.3 土壤有机碳

由表 4 可知，在 2021—2022 年和 2022—2023 年两个小麦生育期内，秸秆还田方式和施氮量对 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层 SOC 含量具有显著影响（少数生育期无显著影响），且还田方式和施氮量的交互作用在大多数生育期不显著。在两个试验年，RT 和 DT 处理 0 ~ 20 cm 土层 SOC 含量随生育期整体表现出先减少后增加的趋势（图 4）。在 2021—2022 年

和 2022—2023 年，在小麦各生育期，不同秸秆还田方式对 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层 SOC 含量影响不同，其中 RT 处理 0 ~ 20 cm 土层 SOC 含量在小麦生育期均显著高于 DT 处理（2021—2022 年秸秆腐解 120 d 除外），在 2021—2022 年和 2022—2023 年分别提高了 5.22% ~ 13.49% 和 2.69% ~ 12.50% ($P<0.05$)；DT 处理 20 ~ 40 cm 土层 SOC 含量在小麦各生育期均高于 RT 处理，两年分别提高 20.82% ~ 60.55% 和

表 4 秸秆还田方式、施氮量和两者之间的交互作用对土壤有机碳的方差分析

显著性分析	土层 (cm)	2021—2022 年				2022—2023 年			
		20 d	60 d	120 d	220 d	20 d	60 d	120 d	220 d
秸秆还田方式 (T)	0 ~ 20	***	***	***	***	***	ns	***	***
	20 ~ 40	***	***	***	***	***	***	***	***
施氮量 (N)	0 ~ 20	ns	***	*	*	*	*	*	*
	20 ~ 40	**	**	ns	*	ns	**	**	*
T × N	0 ~ 20	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
	20 ~ 40	***	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns

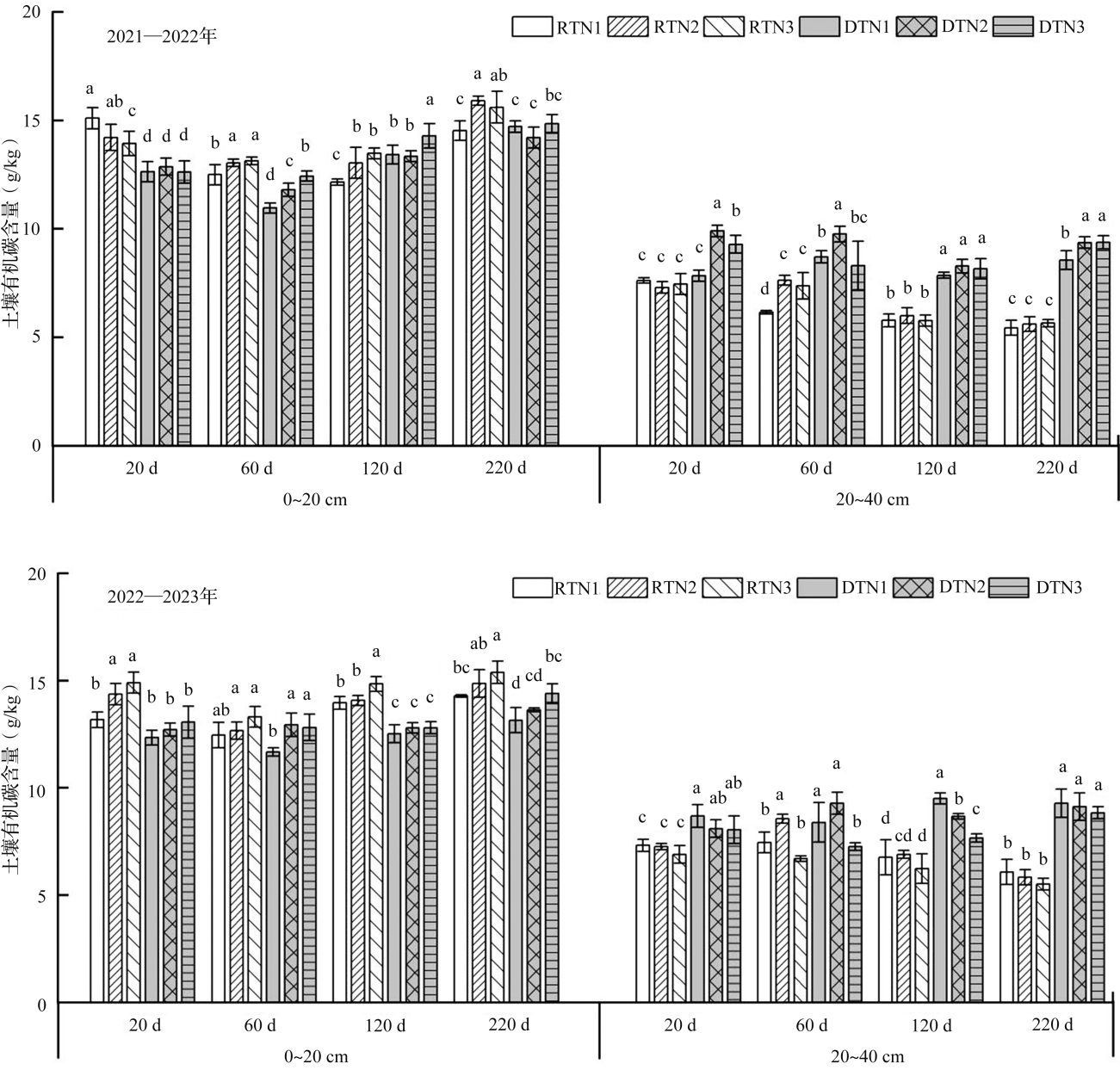


图 4 秸秆还田方式和施氮量对土壤有机碳含量的影响

注：柱上不同小写字母表示相同土层相同腐解天数下不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

9.47% ~ 53.60% ($P<0.05$)。在两个试验年,在玉米秸秆腐解第 20 d 时,不同秸秆还田方式下,施氮量对 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层 SOC 的影响不同,施氮量可显著影响 RT 处理 0 ~ 20 cm 土层 SOC 含量,但对 DT 处理的影响则表现在 20 ~ 40 cm 土层。在秸秆腐解 60、120 和 220 d 时,0 ~ 20 cm 土层 SOC 含量基本随施氮量的增加而增加,且较 N1 处理相比,N2 和 N3 处理 SOC 含量显著提高 2.92% ~ 9.03% 和 1.43% ~ 8.52% ($P<0.05$)。在 20 ~ 40 cm 土层,除腐解至 60 d 时 T2 与 T1、T3 差异显著外,RT 各处理间 SOC 含量无显著差异,而 DT 处理间在不同年份不同施氮量 SOC 含量变化特征不同。

2.4 小麦产量及其构成因素

在 2021—2022 年和 2022—2023 年,秸秆还田方式和施氮量对小麦产量的影响均存在交互作用

(表 5)。在两个试验年,DT 处理小麦产量明显高于 RT 处理,分别提高 4.26% 和 3.41% ($P<0.05$)。在 2021—2022 年,RT 处理下 N1 处理小麦产量显著高于 N3 处理,在 DT 处理下 N2 和 N3 处理小麦产量显著高于 N1 处理;与 2021—2022 年变化特征相似,在 2022—2023 年,RT 处理下 N1 处理小麦产量显著高于 N3 处理,在 DT 处理下 N3 处理小麦产量显著高于 N1 和 N2 处理。2021—2022 年和 2022—2023 年,DT 处理公顷穗数均显著高于 RT 处理,且在 2021—2022 年各施肥处理间公顷穗数存在显著差异,其变化特征与小麦产量一致。秸秆还田方式和施氮量对小麦穗粒数无显著影响。DT 处理小麦千粒重显著高于 RT 处理,但各施氮处理间无显著差异。

表 5 秸秆还田方式和施氮量对产量及其构成因素的影响

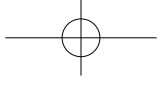
秸秆还田方式	施氮量	2021—2022 年				2022—2023 年			
		产量 (kg/hm ²)	公顷穗数 (×10 ⁴ 个/hm ²)	穗粒数	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	公顷穗数 (×10 ⁴ 个/hm ²)	穗粒数	千粒重 (g)
RT	N1	8363.80a	670.65a	29.48a	45.60a	8195.04a	609.68a	31.68a	47.23a
	N2	7955.85ab	591.54b	29.35a	45.75a	8031.60ab	556.71b	30.23a	48.08a
	N3	7612.85b	586.23b	28.60a	46.16a	7870.60b	527.77b	29.27a	47.03a
DT	N1	7241.95b	603.43b	26.65b	46.82a	8050.05b	601.38a	29.13b	48.51a
	N2	8990.75a	680.03a	28.83ab	46.57a	8266.79b	645.64a	31.43ab	48.10a
	N3	8720.25a	633.13b	29.25a	47.72a	8601.78a	603.43a	32.40a	48.64a
显著性分析									
秸秆还田方式 (T)		ns	*	ns	*	**	*	ns	*
施氮量 (N)		ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
T×N		**	***	ns	ns	***	ns	ns	ns

3 讨论

3.1 还田方式与施氮量对秸秆腐解及碳释放的影响

本研究连续 2 年的试验结果表明,旋耕和深翻两种秸秆还田方式玉米秸秆腐解均表现前期快后期慢的特征,与多数研究结果一致^[15],主要是由于腐解前期秸秆中大量的易降解组分为微生物提供丰富碳源,微生物大量增殖,活性提高,宏观表现为秸秆快速腐解,随着腐解的进行,难降解组

分占比逐步提高,微生物活性下降,秸秆腐解速率随之减缓^[16]。由于 2022—2023 年小麦季积温和降水量明显均高于 2021—2022 年,可能因为小麦生长过程中较高的水热条件会提高土壤微生物活性,从而更有利于玉米秸秆的腐解,所以 2022—2023 年的累积腐解率高于 2021—2022 年。秸秆还田方式对秸秆碳释放率有显著影响,随腐解释放出的秸秆碳,或参与土壤有机物的合成,或在微生物作用下分解为 CO₂ 气体排出^[17]。陈建英等^[18]通



过试验得出,马铃薯生育期内,玉米秸秆有机碳释放的变化规律与腐解率趋势基本相同,这与本研究的结果一致。两种还田方式下,旋耕秸秆还田处理前期秸秆累积腐解率显著高于深翻秸秆还田,其主要是由于旋耕秸秆还田处理秸秆埋于 15 cm 左右,且与土壤充分混拌、土壤通气透水性好,此外 0 ~ 20 cm 土层温度高于 20 ~ 40 cm,更有利于土壤微生物对秸秆的分解活动,从而促进了秸秆的腐解。而深翻秸秆还田处理秸秆集中分布于 30 cm 土层,缺乏水分与空气的充分接触,土壤酶和微生物活性较低,且其腐解条件趋于嫌气状况,故其秸秆的腐解强度较小^[8]。后期深翻秸秆还田秸秆累积腐解率显著高于旋耕秸秆还田处理,秸秆深翻还田可增加耕地深层土壤养分含量,可以增加微生物数量、土壤有机碳储存,增强绝大多数土壤酶活性和微生物碳源代谢能力,为微生物繁殖创造了有利的土壤环境,从而增加了土壤微生物数量以及活性^[19],故其后期秸秆腐解率高于旋耕秸秆还田处理。对比两个试验年份,秸秆累积腐解率表现为 2021—2022 年显著低于 2022—2023 年,其可能与降水量有关,水分条件是影响秸秆腐解的决定性因子之一,2022—2023 年在小麦生育后期降水量较高,因此更有利于秸秆的腐解^[20]。

目前关于施氮措施对秸秆腐解以及碳释放特征的影响结果存在差异,李涛等^[21]研究认为秸秆还田配施氮肥可调节了土壤碳氮比,满足秸秆降解和作物生长对氮素的需求。但杨文亭等^[22]研究显示,施氮可能会抑制秸秆的腐解,这主要是因为当氮素过量时会抑制微生物的活性,减弱其腐解能力。本研究结果表明在腐解前期增施适量氮肥可促进秸秆腐解,但在秸秆腐解后期各施氮处理间无显著差异。刘单卿等^[23]通过对不同还田方式下小麦秸秆的腐解特征研究发现,配施氮肥可以促进小麦秸秆前期腐解,与本研究得出相似结论。王静静等^[24]通过研究玉米秸秆还田腐解率发现,增施氮肥能够促进玉米秸秆的腐解,且玉米秸秆腐解率随施氮量的增加而增加。但刘熙明等^[14]发现,基肥投入后对前期秸秆腐解影响较小,秸秆还田配施氮肥主要对后期秸秆腐解率产生影响,这可能与作物类型、土壤质地和气候条件的差异有关。本研究还发现,在腐解前期秸秆深翻还田处理下施氮量 300 kg/hm² 处理秸秆碳释放率均显著高于施氮量

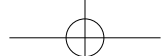
180 和 240 kg/hm²,这是因为秸秆深翻还田配施较高量氮肥,可以有效降低土壤碳氮比,进而使土壤酶活性提高,加速秸秆腐解与碳释放。

3.2 还田方式与施氮量对土壤有机碳的影响

秸秆还田措施可显著提高 SOC 含量,且其提高幅度受秸秆性质、生育期、还田方式、施肥措施等多因素的影响。本试验结果中,在两种还田方式下 0 ~ 20 cm 土层 SOC 含量随生育期整体均表现出先减少后增加的趋势。主要原因可能是生育前期小麦处于快速生长阶段,对土壤养分需求量较大,因此,此时期 SOC 逐渐减少,而成熟期小麦植株凋亡脱落,可向土壤中输入少量的有机物质,从而导致了成熟期耕层 SOC 的含量上升。而黄战等^[25]测定结果表明随生育期的递进, SOC 含量整体呈现下降的趋势,与本研究结果不同,这可能与作物旺盛生长、养分需求较高,土壤的呼吸和微生物活动加快,有机质的矿化分解作用剧烈和随着作物生长、灌溉用水增多使得土壤中溶解性有机碳和颗粒态有机碳随水迁移淋溶导致其整体含量不断下降。秸秆不同还田方式对各土层 SOC 的影响也并不一致,董珊珊等^[7]通过研究玉米秸秆不同还田方式对 SOC 结构的影响发现秸秆浅施可以使土壤表层的 SOC 含量增加,秸秆深还增加土壤亚表层 SOC 含量,与本研究结果一致。其原因是秸秆旋耕还田使秸秆与表层土壤充分接触,加速了微生物对秸秆分解和表层 SOC 的积累^[26],而秸秆深翻还田将秸秆还于亚表层,在土壤深层形成秸秆层,能有效避免营养元素的径流和挥发^[27],使深层“饥饿”的土壤充分与秸秆接触,有利于亚表层土壤腐殖质形成和土壤固碳^[28]。本研究中,施氮措施对 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层 SOC 含量具有显著影响,且在一定范围内随施氮量的增加 SOC 含量呈增加的变化趋势^[29],其主要原因可能是作物秸秆碳氮比较高,施氮降低了土壤碳氮比、促进秸秆腐解、提高农田碳输入^[30],同时施氮能显著提高农作物地上生物量和根生物量,提高了农田土壤碳输入^[31]。

3.3 还田方式与施氮量对小麦产量的影响

小麦产量及其构成因素受秸秆还田方式和施氮量的影响显著。Tian 等^[32]在华北平原进行的 10 年旋耕后转变为 4 年深翻的试验表明,与旋耕相比深翻增加了土壤碳储量,并且小麦—玉米周年产量增加了 24%,这与本研究结论相似。原因如下:深



耕造成土壤耕层变深, 深层土壤容重减少, 有利于根系下扎和水分入渗。其次, 长期旋耕造成土壤 0 ~ 10 cm 表层养分富集, 而中下层土壤养分缺乏^[11], 根系主要分布在表层, 出现上层根系拥挤, 下层根系相对不足, 不利于作物对深层土壤养分的吸收利用和高产稳产^[33]。赵力莹等^[34]发现在长期旋耕的基础上进行翻耕, 虽然改善了土壤的通透性, 但没有提高小麦的产量, 反而使产量降低。这可能是由于深翻还田虽有较好的保土保水作用, 但是耕层松紧不一, 土块较大, 不利于作物的生长发育, 导致产量降低^[35]。黄柯铭等^[36]研究发现秸秆旋耕还田处理下施氮量较少时具有较高的小麦产量以及穗粒数和千粒重, 与本研究结果相似。姚钊等^[37]研究表明, 滴灌条件下在一定施氮范围内, 冬小麦的籽粒产量随着施氮量的增加逐渐增加, 但当超过一定范围后增加氮肥用量无显著增产效果。可能是因为过高的施氮量能减短各穗位籽粒的灌浆持续天数, 升高了平均灌浆速率, 从而减少各穗位籽粒粒重, 继而使产量降低^[38]。还有研究表明深翻处理与旋耕处理相比较, 显著提高了行粒数和千粒重等小麦产量构成因素, 因此籽粒产量显著提高^[39]。原因可能是旋耕处理比深翻处理后期脱肥更加严重, 影响了灌浆速率, 降低了玉米千粒重和穗粒数。

4 结论

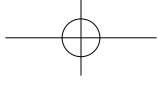
不同秸秆还田方式和施氮量管理措施下, 玉米秸秆腐解和碳释放均呈快速分解 - 逐渐减缓 - 趋于停滞的特点。秸秆还田方式和施氮显著影响秸秆腐解与碳释放, 相较于旋耕还田, 深翻还田和较高量施氮更有利于秸秆腐解与碳释放。秸秆还田方式和施氮显著影响 SOC 的积累, 相较于深翻还田, 旋耕还田和施氮更有利于 0 ~ 20 cm 土层 SOC 的积累, 深翻还田和施氮更有利于 20 ~ 40 cm 土层 SOC 的积累, 且配施中高量氮肥更有利于 SOC 积累; 秸秆旋耕配施低量氮肥和秸秆深翻还田结合较高氮投入可以有效改善小麦产量及其构成, 从而保障产量。

参考文献:

- [1] 杨竣皓, 骆永丽, 陈金, 等. 秸秆还田对我国主要粮食作物产量效应的整合 (Meta) 分析 [J]. 中国农业科学, 2020, 53 (21): 4415-4429.
- [2] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估

算及其利用状况 [J]. 农业工程学报, 2009, 25 (7): 173-179.

- [3] 马芳霞, 王忆芸, 燕鹏, 等. 秸秆还田对长期连作棉田土壤有机氮组分的影响 [J]. 生态环境学报, 2018, 27 (8): 1459-1465.
- [4] 赵颖, 董环, 刘爱群, 等. 玉米秸秆腐熟还田对设施番茄产量品质及土壤理化性质的影响 [J]. 北方园艺, 2023 (3): 43-50.
- [5] Yang Y, Long Y, Li S, et al. Straw return decomposition characteristics and effects on soil nutrients and maize yield [J]. Agriculture, 2023, 13 (8): 1570.
- [6] Sandhu O S, Jat M L, Gupta K R, et al. Influence of residue type and method of placement on dynamics of decomposition and nitrogen release in maize-wheat-mungbean cropping on permanent raised beds: a litterbag study [J]. Sustainability, 2022, 14 (2): 864.
- [7] 董珊珊, 窦森. 玉米秸秆不同还田方式对黑土有机碳组成和结构特征的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36 (2): 322-328.
- [8] 田平, 姜英, 孙悦, 等. 不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2019, 27 (1): 100-108.
- [9] 李荣, 勉有明, 侯贤清, 等. 施氮对还田秸秆腐解及养分释放、土壤肥力与玉米产量的影响 [J]. 作物学报, 2023, 49 (7): 2012-2022.
- [10] 庞党伟, 陈金, 唐玉海, 等. 玉米秸秆还田方式和氮肥处理对土壤理化性质及冬小麦产量的影响 [J]. 作物学报, 2016, 42 (11): 1689-1699.
- [11] 邹文秀, 韩晓增, 严君, 等. 耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, 36 (15): 9-18.
- [12] Latifmanesh H, Deng A, Li L, et al. How incorporation depth of corn straw affects straw decomposition rate and C & N release in the wheat-corn cropping system [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 300: 107000.
- [13] 石琳, 金梦灿, 单旭东, 等. 不同形态氮素对玉米秸秆腐解与养分释放的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38 (2): 277-285.
- [14] 刘熙明, 王滢渺, 田洪涛, 等. 秸秆还田方式与施氮量对秸秆腐解及玉米氮素利用的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2023, 28 (10): 15-26.
- [15] 马琳, 吴景贵, 陈晓东, 等. 不同界面玉米秸秆腐解特征及其碳释放量动态变化 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48 (9): 106-108, 112.
- [16] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (2): 374-380.
- [17] Williams M A, Myrold D D, Bottomley P J. Distribution and fate of ¹³C-labeled root and straw residues from ryegrass and crimson clover in soil under western Oregon field conditions [J]. Biology

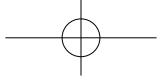


- and Fertility of Soils, 2006, 42: 523–531.
- [18] 陈建英, 罗超越, 邱慧珍, 等. 不同施氮量对半干旱区还田玉米秸秆腐解及养分释放特征的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38 (1): 101–106.
- [19] 丁琪洵, 汪甜甜, 童童, 等. 深耕深松对土壤特性和作物产量影响研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2023, 51 (12): 34–41.
- [20] 黄战, 马泽跃, 冯雷, 等. 氮肥施用对库尔勒香梨园土壤有机碳和无机碳剖面分布的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023 (6): 50–60.
- [21] 李涛, 何春娥, 葛晓颖, 等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2016, 24 (12): 1633–1642.
- [22] 杨文亨, 王晓维, 徐健程, 等. 施氮量和土壤含水量对红壤区黑麦草腐解和氮素释放的影响 [J]. 生态学杂志, 2018, 37 (9): 2589–2595.
- [23] 刘单卿, 李顺义, 郭夏丽. 不同还田方式下小麦秸秆的腐解特征及养分释放规律 [J]. 河南农业科学, 2018, 47 (4): 49–53.
- [24] 王静静, 毛筱晔, 邹明伟, 等. 不同氮肥运筹下水稻秸秆腐解特征及对稻茬小麦产量和土壤养分的影响 [J]. 江西农业学报, 2017, 29 (6): 54–57.
- [25] 黄战, 马泽跃, 冯雷, 等. 氮肥施用对库尔勒香梨园土壤有机碳和无机碳剖面分布的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023 (6): 50–60.
- [26] Henriksen T M, Breland T A. Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities during decomposition of wheat straw in soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31 (8): 1121–1134.
- [27] 黄毅, 毕素艳, 邹洪涛, 等. 秸秆深层还田对玉米根系及产量的影响 [J]. 玉米科学, 2013, 21 (5): 109–112.
- [28] Zhou H, Zhang C L, Zhang W L, et al. Evaluation of straw spatial distribution after straw incorporation into soil for different tillage tools [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104440.
- [29] 姚俊红, 武俊男, 王呈玉, 等. 长期不同施氮量下黑土团聚体稳定性及有机碳含量的变化 [J]. 农业环境科学学报, 2023, 43 (1): 1–15.
- [30] 朱远芃, 金梦灿, 马超, 等. 外源氮肥和腐熟剂对小麦秸秆腐解的影响 [J]. 生态环境学报, 2019, 28 (3): 612–619.
- [31] 曾莉, 张鑫, 张水清, 等. 不同施氮量下潮土中小麦秸秆腐解特性及其养分释放和结构变化特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (9): 1565–1577.
- [32] Tian S Z, Ning T Y, Wang Y, et al. Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 207–213.
- [33] 陈金, 庞党伟, 韩明明, 等. 耕作模式对土壤生物活性与养分有效性及冬小麦产量的影响 [J]. 作物学报, 2017, 43 (8): 1245–1253.
- [34] 赵力莹, 董文旭, 胡春胜, 等. 耕作方式转变对冬小麦季农田温室气体排放和产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (11): 1613–1623.
- [35] 王玉玲, 李军. 利于小麦-玉米轮作田土壤理化性状和作物产量的耕作方式研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (5): 1139–1150.
- [36] 黄柯铭, 仝昊天, 韩燕来, 等. 秸秆还田与减氮对砂姜黑土理化指标及小麦产量的影响 [J]. 中国农学通报, 2020, 36 (8): 21–26.
- [37] 姚钊, 王重阳, 崔静. 施氮量对滴灌冬小麦不同穗位籽粒灌浆特性的影响 [J]. 浙江农业学报, 2021, 33 (4): 576–585.
- [38] 李娜, 张保军, 张正茂, 等. 不同施氮量和播量对‘普冰151’干物质积累特征及籽粒灌浆特性的影响 [J]. 西北农业学报, 2017, 26 (5): 693–701.
- [39] Kuang N, Tan D, Li H, et al. Effects of subsoiling before winter wheat on water consumption characteristics and yield of summer maize on the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2020, 227: 105786.

Effects of straw returning methods combined with nitrogen fertilizer on decomposition characteristics of maize straw and soil organic carbon

LI Ze-yi^{1, 2}, MA Yu-jie¹, FU Xin^{1*}, PENG Zheng-ping^{1, 2}, LI Xu¹ (1. College of Land and Resources/College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agricultural University, Baoding Hebei 071001; 2. State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Baoding Hebei 071001)

Abstract: It is important to investigate straw decomposition, nutrient release and soil organic carbon under different maize straw returning methods and nitrogen fertilizer managements in wheat-maize rotation area of North China Plain. Based on a 2-year field experiment, this study investigated dynamic changes of straw decomposition and soil organic carbon using nylon net bag method under two straw returning methods (RT: straw rotary tillage and DT: deep tillage) and three nitrogen application levels (N1: 180 kg/hm², N2: 240 kg/hm² and N3: 300 kg/hm²). The results showed that straw decomposition rate of each treatment showed a trend of fast change in the early stage, then slow change and finally tended to stagnate. The straw returning method and nitrogen application level significantly affected straw decomposition characteristics. The straw decomposition rate with DT treatments was significantly higher than those of RT treatments, increased by 4.36%–6.25%. The straw decomposition rate increased with the increase of nitrogen fertilizer application level in the early straw decomposition



stage, but there was no significant difference among the nitrogen fertilization treatments in the late stages. The two factors of straw returning method and nitrogen application rate had interaction on the cumulative release of straw carbon. The rate of straw carbon release was higher with N1 than other nitrogen levels under RT treatment, but was higher with N3 than other nitrogen levels under DT treatment. The straw returning method and nitrogen application rate significantly affected the soil organic carbon content, and had an interactive effect. The soil organic carbon content with RT treatment was significantly higher than that of DT treatment during wheat growth period in 0–20 cm soil layer, and soil organic carbon content was increasing with nitrogen application level, but there was an opposite trend in 20–40 cm soil layer. The straw returning method and nitrogen application level had a significant influence on wheat yield and its components, and had an interactive effect on wheat yield. The wheat yield under DT treatment was higher than RT treatment, and increased by 4.26% and 3.41% in two years. Under RT treatment, wheat yield with N1 was higher than other nitrogen levels, but under DT treatment, N2 and N3 were more conducive to increasing wheat yield. Under the conditions of this study, integrated straw deep ploughing returning and nitrogen fertilizer of 240 kg/hm² could promote straw decomposition and its carbon release, increase organic carbon in surface and sub-surface soil and wheat yield, while straw rotary tillage returning with nitrogen fertilizer of 180 kg/hm² was more conducive to increasing soil organic carbon in surface soil and wheat yield.

Key words: straw returning method; nitrogen application level; straw decomposition; soil organic carbon; wheat yield