

基于 DNDC 模型模拟的冬小麦田土壤有机碳和作物产量对地表覆盖的响应

颜学斌^{1,2}, 王 俊^{1,2}, 王科锋³, 白红英^{1,2}

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127;
3. 西北大学生命科学学院, 陕西 西安 710069)

摘 要: 依托前期长期定位试验, 基于 DNDC 过程模型, 对秸秆和地膜覆盖条件下冬小麦田土壤有机碳和小麦产量的长期变化规律进行了模拟研究。结果表明, DNDC 模拟的有机碳含量和冬小麦产量变化与田间观测结果较一致, 能较理想地模拟两种覆盖措施对土壤有机碳和作物产量的长期影响。模拟结果显示, 在 50 a 时间尺度上, 不覆盖与地膜覆盖处理下 0~50 cm 土层土壤有机碳含量呈下降趋势, 年均变化量分别为 $-11.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $-25.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 而全量 ($9\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 与半量 ($4\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 秸秆覆盖处理下土壤有机碳呈增加趋势, 年平均变化量分别为 $256.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $116.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 并表现为前 5 a 增量较多、后期增量减小, 并在第 40~50 年达到平衡的趋势。冬小麦产量模拟结果在 $5\,713.3 \sim 7\,046.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与不覆盖处理相比, 地膜覆盖、半量和全量秸秆覆盖条件下冬小麦产量 50 a 平均分别提高了 2.7%、9.8% 和 13.4%。模拟的土壤有机碳含量变化与小麦产量间存在显著正相关关系。总体来看, 与不覆盖或地膜覆盖相比, 旱作冬小麦农田进行秸秆覆盖具有长期的固碳增产效果。

关键词: DNDC 模型; 秸秆覆盖; 地膜覆盖; 土壤有机碳; 产量; 冬小麦

中图分类号: S153.6⁺2; S512.1⁺1 **文献标志码:** A

Responses of soil organic carbon and crop yield to surface mulching with straw and plastic film in winter wheat field using DNDC model

YAN Xuebin^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, WANG Kefeng³, BAI Hongying^{1,2}

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China;
2. Key Laboratory of Surface System and Environmental Carrying Capacity of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710127, China;
3. The college of life sciences, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: The long-term trends of winter wheat field soil organic carbon (SOC) and crop yield to straw mulching and plastic film mulching were modelled using the Denitrification-decomposition (DNDC) model based on a winter wheat mulching field experiment on the Loess Plateau of China. Strong consistence was found between the modelled values with field observations for both SOC and yield, indicating that DNDC was a useful tool to test the long-term effects of surface mulching on these two indicators. At a 50-year scale, the SOC content at 0~50 cm depth showed a downward trend under no mulching and plastic film mulching, with an average annual change of $-11.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $-25.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. On the contrary, the SOC content presented an increasing trend under straw mulching at rates of $4\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $9\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, with an average annual change of $116.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $256.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. It was manifested as a trend of more increments in the first 5 years, and a decrease in later increments and reaching equilibrium in the 40~50 years. The simulated wheat yield ranged from $5\,713.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ to $7\,046.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Compared with no mulching, wheat yield increased by 2.7%, 9.8% and 13.4% with plastic film mulching, and straw mulching at $4\,500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $9\,000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ averaged across 50 years, respectively. There was a significant positive correlation between the modelled SOC content and wheat yield. In general, compared with no mulching, plastic film mulching and straw mulching could be a reliable management practice

for long-term carbon sequestration and yield increase in the dryland agricultural systems on the Loess Plateau.

Keywords: DNDC model; straw mulching; plastic film mulching; soil organic carbon; yield; winter wheat

近几十年来,地表覆盖措施因良好的蓄水保墒和增产效果在我国旱作地区得到广泛应用,其中以秸秆和地膜覆盖措施最为普遍。秸秆或地膜覆盖可以有效地蓄水保墒,提高水分利用效率和作物产量^[1-2]。由于有机碳影响着土壤肥力和质量,进而影响作物产量^[3]。因此,研究不同地表覆盖措施对农田土壤有机碳的影响,对保持农田土壤肥力质量、保障作物生产具有重要意义。

田间监测是农田生态过程定量观测的主要手段之一,但难以反映长时间或者区域尺度的农田土壤有机碳和作物产量变化规律。随着研究技术手段的发展,一些陆地生态系统模型如 DNDC(Denitrification-decomposition)逐渐被应用于长期定位试验观测数据的整合和预测中^[4]。DNDC 模型主要用于模拟农田生态系统中的碳和氮生物地球化学循环过程,已成为目前国际上最为成功的生物地球化学循环模型之一^[4-7]。自上世纪九十年代开始,DNDC 模型在国内逐渐得到应用^[8],并被用于估算农田生态系统中土壤有机碳及作物产量的动态变化^[9-11],是保持土壤有机碳库平衡、提高土壤肥力的重要工具之一。

本研究基于长期田间定位试验,在利用多年实测资料对 DNDC 模型进行验证的基础上,应用该模型模拟研究了秸秆和地膜覆盖条件下土壤有机碳和作物产量的长期变化规律,旨在为旱作农田土壤碳库可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验

冬小麦地表覆盖定位试验于 2008 年 9 月开始在中国科学院长武农业生态试验站(107°41'E,35°14'N)进行。该站地处渭北旱塬,海拔 1 220 m,年平均降水量为 584.2 mm,其中夏季休闲期(7—9 月)平均降水 323 mm,冬小麦生长期平均降水为 281 mm,年平均气温 9.1℃,年日照时数 2 230 h,无霜期 171 d,是典型的旱作农业区。土壤质地为粘壤质黑垆土,表层土壤 pH 值为 8.4,土壤有机碳(0~10 cm)含量为 8.7 g·kg⁻¹,肥力中等。

田间试验包括无覆盖处理(CK)、作物生育期全量秸秆覆盖(覆盖量 9 000 kg·hm⁻²,HSM)、生育期半量秸秆覆盖(覆盖量 4 500 kg·hm⁻²,LSM)、生育期地膜覆盖(PM)共 4 个处理,每处理 3 次重复,随机区组排列,每小区面积 24 m²。供试冬小麦品种

为长武-134,于每年 9 月下旬播种(播量为 15.75 kg·hm⁻²),翌年 6 月收获,收获后土壤休闲。播种前采用圆盘耙机耕松土,深度 10 cm,并施入尿素(135 kg·hm⁻²)和过磷酸钙(90 kg·hm⁻²)作为基肥。HSM 和 LSM 处理使用各小区收获后晒干的秸秆,在播种前将秸秆切割至长 5~10 cm 进行地表覆盖,并持续至次年播种翻耕前清除;PM 处理在小麦播种翻耕前清除原有破碎地膜,翻耕后覆膜,并进行穴播。所有处理其他田间管理措施(耕地、除草等)保持完全一致。

田间试验观测指标主要包括土壤有机碳和作物产量。2009—2016 年期间每年 6 月下旬小麦收获后采集表层(0~10 cm)土壤样品,使用“S”型采样法每小区采集 5 个样品,充分混合后风干,过 0.2 mm 筛,然后使用重铬酸钾氧化-外加热法^[12]测定样品中有机碳含量。冬小麦收获后将小麦脱粒晒干,测定冬小麦产量。

1.2 DNDC 模型

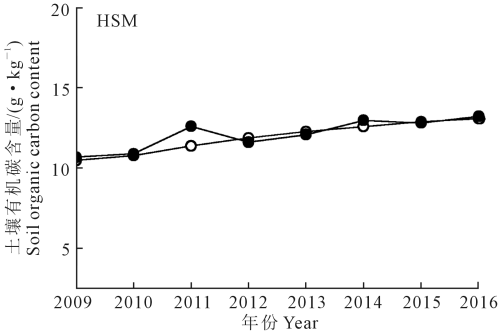
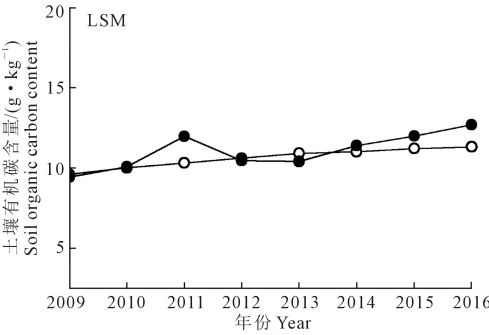
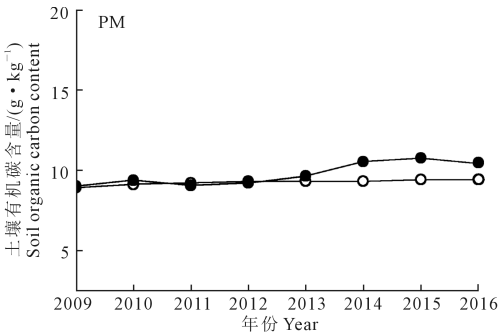
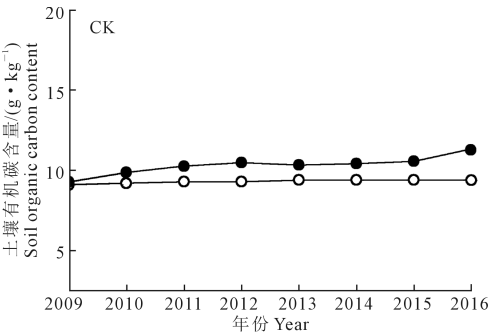
DNDC 模型是一个用于模拟和追踪农业生态系统中碳氮生物地球化学循环的过程模型,可以用来模拟农业生态系统碳氮排放、农作物产量、土壤固碳作用以及硝酸盐淋失等过程^[13]。模型由两部分组成:第一部分包括土壤气候、植物生长和有机质分解等 3 个子模型;第二部分包括硝化、反硝化和发酵等 3 个子模型。6 个子模型均以小时或日为时间步长进行模拟,并互相传递信息,用于追踪不同气象、土地利用、土壤、管理条件下植物-土壤系统中碳氮元素的迁移和转化过程^[11]。DNDC 模型具有模拟功能强大、操作简便、软件界面简洁等优点,已在世界许多地区得到验证应用^[7,14],在我国旱作农业区,DNDC 模型也被证明具有很好的模拟效果^[15-16]。

本研究运用 DNDC 模型 9.5 版本,按田间试验设计设置 CK、PM、LSM、HSM 4 个处理,研究不同覆盖方式对土壤有机碳含量和冬小麦产量的长期影响。有研究表明在秸秆还田的情景下,土壤有机碳库在 50 a 后变化已较小^[17-18],因此我们将 DNDC 模型运行时间设置为 50 a。各管理情景的输入数据除了覆盖方式不一致外,其他条件(如气象、土壤)均保持一致。2016 年气象数据在历年数据中资料较为完整,且与该地区多年平均气候状况较接近,利用 2016 年气象数据支持模型运行具有一定可行性,因此将 2016 年气象数据重复利用 50 a 以支持模型

运行。在运行 DNDC 模型时,仅需要设置土壤表层(0~10 cm)有机碳含量,而对土壤更深层有机碳含量并无具体设置选项,这是模型本身缺陷之一。为了更好地模拟农田土壤有机碳含量变化的整体情况,我们选择模型模拟结果中更大范围的土壤有机碳含量(0~50 cm 土层)进行整理分析。

模型验证能评估和减小模拟结果的不确定性,是开展模型模拟评价的重要前提^[11]。本研究利用田间试验所获得的土壤有机碳含量和冬小麦产量来进行模型验证。模型输入数据包括:实测气象资料(逐日最高和最低气温、降水)、实测土壤参数(质地、容重、pH 值、土壤有机碳含量等)和农田管理资料(播种和收获日期、翻耕、施肥管理、秸秆还田等),其中气象数据从中国科学院长武农业生态试验站气象观测站获得,土壤因子参数及农田管理因子数据为田间试验实测数据。在输入的数据支撑下,DNDC 共运行 9 a(2008—2016 年,第一年为播种年)。然后将模型模拟结果(有机碳含量、籽粒产量)与实际观测数据进行比较,计算相对均方根误差(RMSE)、标准化均方根误差(NRMSE)以及决定系数(R^2),评估模拟结果与观测结果的吻合度。计算公式:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(S_i - O_i)^2}{(O_m)^2}} \times 100\%$$



—○— 模拟值 Simulated value —●— 实测值 Measured value

注:PM-地膜覆盖,LSM-半量秸秆覆盖(4 500 kg·hm⁻²),HSM-全量秸秆覆盖(9 000 kg·hm⁻²),下同。

Note: PM- plastic film mulching, LSM- half straw mulching (4 500 kg·hm⁻²), HSM- straw mulching (9 000 kg·hm⁻²), the same blew.

图 1 不同覆盖处理下土壤有机碳含量模拟值与实测值比较

Fig.1 Comparison of simulated and measured soil organic carbon content under different mulching treatments

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(S_i - O_i)^2}{N}}$$

式中, N 为处理的个数, S 为模拟值, O 为实测值, O_m 为实测值的平均值。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 处理数据,Origin 19 作图,SPSS 20 进行单因素方差分析,各处理之间差异显著性的多重比较采用最小显著差异(LSD 0.05)法。

2 结果与分析

2.1 DNDC 模型验证

2.1.1 土壤有机碳 不同覆盖处理下土壤有机碳含量模拟值与实测值比较如图 1 所示。随着种植年限增长,各处理土壤有机碳含量均呈增加趋势,其中 HSM、LSM 处理增加趋势大于 CK 和 PM 处理。DNDC 模型模拟结果与实测值表现出较强的一致性,有机质含量变化趋势也基本相同。DNDC 模型模拟值与实测值比较(表 1),各处理下决定系数(R^2)均达到显著或极显著水平,模拟值与实测值的 RMSE 值在 0.05~1.24 g·kg⁻¹ 之间波动变化,而 NRMSE 值在 0.36%~10.93% 之间变化,表明利用 DNDC 模型进行土壤有机碳含量模拟具有可靠性。

表 1 DNDC 模型模拟土壤有机碳 (SOC) 含量精度分析

Table 1 Accuracy analysis of SOC content simulation using DNDC model

处理 Treatment	项目 Item	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	R ²	r
CK	RMSE/(g·kg ⁻¹)	0.19	0.53	0.71	0.75	0.58	0.64	0.79	1.24	0.657	0.840**
	NRMSE/%	2.00	5.36	6.96	7.13	5.57	6.14	7.44	10.93		
PM	RMSE/(g·kg ⁻¹)	0.22	0.22	0.16	0.15	0.24	0.79	0.85	0.81	0.437	0.720*
	NRMSE/%	2.45	2.34	1.79	1.66	2.49	7.47	7.96	7.79		
LSM	RMSE/(g·kg ⁻¹)	0.25	0.39	0.93	0.36	0.33	0.26	0.05	0.11	0.495	0.753*
	NRMSE/%	2.30	3.55	7.38	3.13	2.74	1.99	0.36	0.83		
HSM	RMSE/(g·kg ⁻¹)	0.14	0.22	1.08	0.21	0.42	0.39	0.48	0.86	0.736	0.880**
	NRMSE/%	1.45	2.18	9.01	2.04	3.99	3.43	4.05	6.81		

注:RMSE-相对均方根误差,NRMSE-标准化均方根误差; ** 极显著水平 ($P<0.01$), * 显著水平 ($P<0.05$)。下同。

Note: RMSE- root mean square error, NRMSE- normalized root mean square error. ** and * indicate significant differences at $P<0.01$ and $P<0.05$ levels, respectively. The same below.

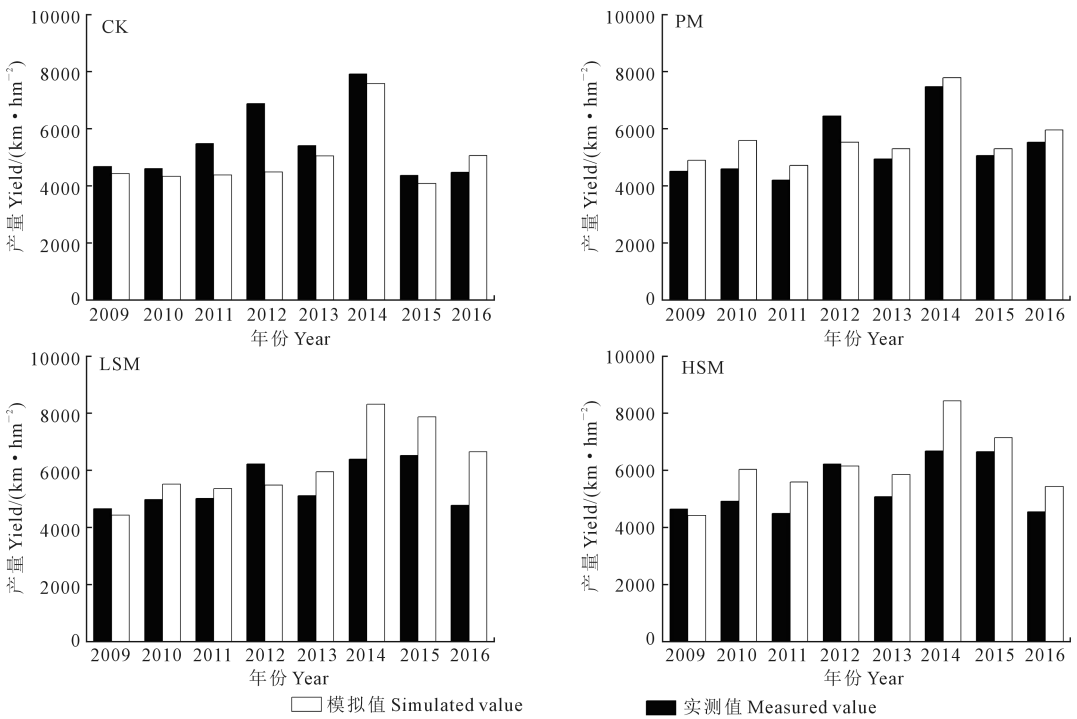


图 2 不同覆盖处理下作物产量模拟值与实测值比较

Fig.2 Comparison of simulated and measured crop yields under different mulching treatments

2.1.2 冬小麦产量 不同覆盖方式下冬小麦产量模拟值与实测值如图 2 所示。实测结果显示,作物产量在不同年份间存在较大差异,而不同处理间,秸秆覆盖和地膜覆盖处理年平均产量与 CK 相比无显著性差异。

通过各年份作物实际产量与模拟产量的对比发现,CK 处理实际产量大部分年份高于模拟产量,只有 2009、2010、2016 年的实际产量结果略低于模拟产量。而在 PM、HSM、LSM 等处理下,大部分年份模拟产量高于实际产量。不同处理下决定系数均达到显著或极显著水平。不同处理下产量模拟值与实测值的 RMSE 值在 51.57~1 462.7 kg·hm⁻² 之间波动变化(表 2),而 NRMSE 值在 0.83%~

24.6%变化,所有值都在 25%以下,说明 DNDC 模型能够较准确地模拟不同覆盖处理下冬小麦产量的变化。

2.2 基于 DNDC 模型土壤有机碳含量年变化量长期动态模拟

土壤有机碳含量年变化量的长期动态如图 3 a 所示。在 50 a 时间尺度上,土壤有机碳平均年变化量表现为 HSM>LSM>CK>PM ($P<0.05$)。其中 CK 处理下土壤(0~50 cm 土层)有机碳含量年变化在初期为正值,然后迅速降低,至第 8 年变为负值(-2.9 kg·hm⁻²),后期缓慢减少,在第 50 年达到-33 kg·hm⁻²,50 a 平均年变化量为-11.3 kg·hm⁻²。PM 处理下有机碳含量年变化趋势与 CK

表 2 DNDC 模型模拟作物产量精度分析

Table 2 Accuracy analysis of wheat yield simulation using DNDC model

处理 Treatment	项目 Item	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	R^2	r
CK	$RMSE/(kg \cdot hm^{-2})$	148.97	205.41	675.74	1462.7	229.16	289.42	201.21	379.43	0.486	0.748 *
	$NRMSE/\%$	3.19	4.46	12.35	21.30	4.24	3.65	4.62	8.49		
PM	$RMSE/(kg \cdot hm^{-2})$	238.30	610.04	313.23	562.8	223.49	189.91	270.45	373.71	0.658	0.873 **
	$NRMSE/\%$	5.29	13.30	7.46	8.74	4.53	2.54	5.35	6.76		
LSM	$RMSE/(kg \cdot hm^{-2})$	164.11	329.61	215.44	450.54	515.37	1215.44	845.1	1176.11	0.496	0.739 *
	$NRMSE/\%$	3.52	6.63	4.30	7.25	10.09	19.03	12.96	24.62		
HSM	$RMSE/(kg \cdot hm^{-2})$	182.73	681.09	672.45	51.57	476.85	781.79	344.91	946.75	0.725	0.841 **
	$NRMSE/\%$	3.93	13.83	14.96	0.83	9.40	11.70	5.18	20.81		

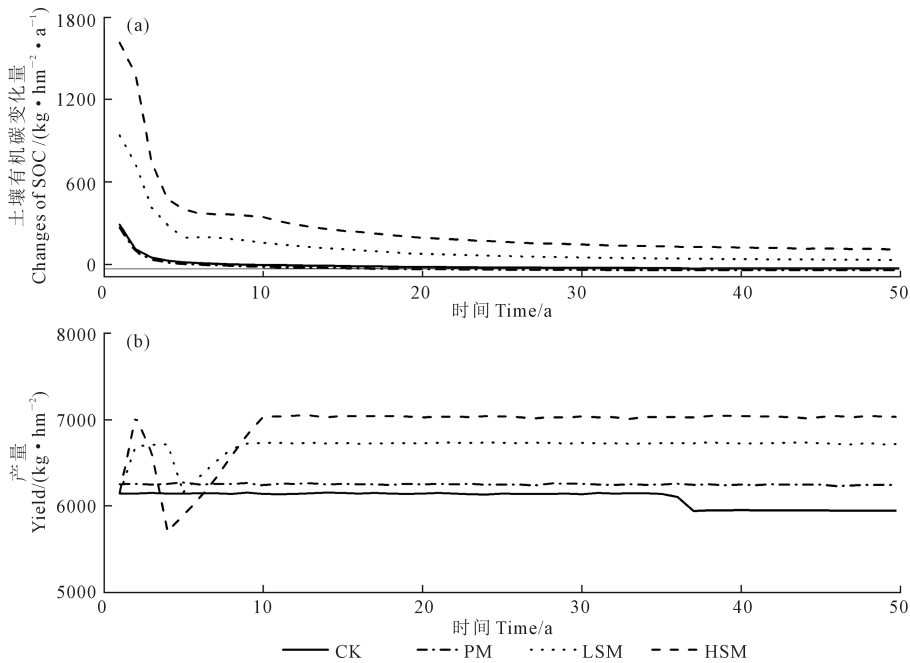


图 3 不同覆盖处理下农田 50 年土壤有机碳变化(0~50 cm)及冬小麦产量动态

Fig.3 Changes in soil organic carbon content (0~50 cm) and wheat yield dynamic in 50 years under different mulching treatments

处理相似,同样表现为有机碳含量增量在初期迅速降低的趋势,在第 6 年变为负值($-6.2\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),在第 50 年达到 $-43.5\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,50 a 平均年变化量为 $-25.2\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。HSM 处理和 LSM 处理趋势相似,土壤有机碳含量呈现出明显增加趋势,具体表现为前期有机碳含量迅速增加,后期增量减小,直至变化量逐渐减小趋于稳定,达到土壤有机碳库平衡,50 a 平均年变化量分别为 $256.9\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $116.3\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,秸秆全量覆盖处理下的土壤有机碳含量提升幅度大于秸秆半覆盖处理。

2.3 基于 DNDC 模型冬小麦产量年变化量长期动态模拟

使用 DNDC 模型模拟的不同覆盖处理下 50 a 冬小麦的产量变化如图 3b 所示。CK 处理下,冬小麦产量前期保持相对平稳状态,第 38 年出现显著降低之后逐年下降,最终较初始值降低了 4.1% ($P<$

0.05)。PM 处理下,冬小麦产量一直保持在 $6\ 250\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,波动幅度较小,初始值与最终值相差不超过 1%。LSM 处理下冬小麦产量在前期出现明显波动,表现为先升高后降低再升高,随后在第 9 年趋于稳定并保持在 $6\ 730\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,较初始值提高约 9.1% ($P<0.05$)。HSM 处理下冬小麦的产量波动更为明显,波动轨迹与 LSM 处理相似并且初期波动幅度更大,之后在第 10 年达到平衡状态并稳定在 $7\ 000\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,较初始值提高约 13.9% ($P<0.05$)。

对比不同覆盖处理下冬小麦的产量变化,具体表现为 $\text{HSM}>\text{LSM}>\text{PM}>\text{CK}$ 。与 CK 相比,HSM、LSM 和 PM 处理下冬小麦年平均产量分别提高了 13.4%、9.8% 和 2.7% ($P<0.05$),表明秸秆全覆盖措施更能显著提高作物产量。

2.4 冬小麦产量与土壤有机碳含量的相关性

在模型模拟的前十年中,不同覆盖方式下冬小

麦产量均出现不同程度的波动。由于在模型运行中,不同处理间的基础参数均保持一致,推测这些波动与不同处理导致的有机碳含量变化相关。为了验证猜想,对 50 a 尺度上作物产量与土壤有机碳含量进行了相关性分析,结果表明不同覆盖处理下冬小麦产量均与土壤有机碳含量存在极显著相关性(图 4),其中覆盖处理的决定系数明显低于 CK。尤其是在两个覆盖处理中,小麦产量前 10 a 的产量波动可能与初期土壤有机碳的快速下降有关,二者变化具有一定关联性。

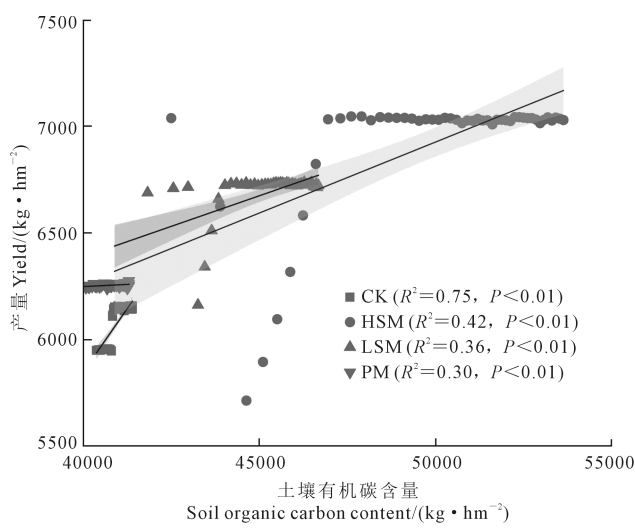


图 4 不同覆盖处理下冬小麦产量与有机碳含量的相关性
Fig.4 Correlation between winter wheat yield and organic carbon content under different treatments

3 讨 论

秸秆和地膜覆盖作为重要的保水增产措施近年来在我国西北旱作农业区得到了广泛应用^[19]。本文模拟结果表明,秸秆覆盖措施可以在确保农田有机碳储量保持稳步提升的同时实现冬小麦的增产,这与张彤勋等^[20]、郑凤君等^[21]的研究结果一致。在模型模拟中,秸秆覆盖下土壤有机碳含量始终呈增加的趋势,这是因为进行秸秆覆盖增加了额外有机物输入,作物秸秆分解促进土壤养分循环^[22],同时,秸秆覆盖的保水抑蒸作用改善土壤水分状况^[23]。二者共同作用下能够促进作物生物量积累,提高了根系残留和凋落物输入。然而 Six 等^[24]研究认为土壤碳储量不可能无限制地增加, SOC 存在饱和水平。Hutchinson 等^[25]认为土壤并不代表一个碳的永久“缓冲溶液”,当农田管理措施、气象条件等环境因素保持长期不变时,土壤有机碳将达到一个新的平衡。在本次 DNDC 模型模拟研究中,秸秆覆盖下土壤有机碳变化量表现为前

期年增长率较高,后快速降低逐渐趋于平缓,在第 40~50 年土壤有机碳库逐渐趋于稳定,也证明了这一点。

与秸秆覆盖不同,地膜覆盖处理的模拟结果显示土壤有机碳后期呈下降趋势,且降低幅度显著大于不覆盖(对照)处理。这可能是由于地膜覆盖加速了微生物对土壤有机质的分解矿化所致^[26]。也有学者报道,长期的地膜覆盖能够通过改善土壤水热状况促进作物生长,进而补充土壤碳库^[27-29]。这可能是由于不同地区的其他环境因素(降水、气温等)所引起,而模型是假定特定的气候与农田管理措施,客观反映土壤有机碳的演变规律。

本研究同时发现土壤有机碳的变化与冬小麦产量间显著相关。本研究中,地膜覆盖条件下土壤有机碳的流失大于不覆盖处理(对照),但其作物产量高于对照,说明作物的生长发育是一个复杂的过程,作物产量的变化可能与土壤的环境因素(土壤温度、土壤水分、土壤养分)的改变有关^[30]。地膜覆盖可以通过增加地表土壤含水量,降低昼夜温差的方式提高冬小麦的产量。刘宁等^[31]运用 DNDC 模型模拟发现通过沟垄覆膜可以减少田间土壤蒸发面积,减少蒸发,提高地面接收太阳辐射的能力,进而提高作物产量。王晓峰等^[32]、吕晓男等^[33]研究发现由于秸秆覆盖为作物生长提供了良好的水分条件,秸秆覆盖处理的产量均高于不覆盖。Li 等^[34]研究发现地膜覆盖表现出良好的保温和保水效应,通过改善耕层土壤水热状况,活化土壤养分,为作物生长发育创造了一个相对适宜的农田小气候环境,从而提高了产量。多数研究和生产实践表明,环境因素尤其是气候因素对耕地产量的影响大于土壤有机碳对作物产量的影响^[35],所以在模型产量验证的实测数值中各处理间作物产量无显著性差异,原因可能是由于其他气候因素所造成。土壤有机碳依旧是土壤肥力的重要指标之一^[36],模型模拟研究可以排除其他因素对作物产量的影响。本文中 50 a 时间尺度的模拟结果表明,秸秆覆盖措施可以通过提升土壤有机碳含量,增强土壤肥力,进而提高了冬小麦产量。同时,土壤有机碳含量的变化会引起冬小麦产量出现波动。

本研究表明,DNDC 模型对于旱作农田土壤有机碳含量及冬小麦产量具有较为准确的模拟效果,模拟值与实测值的变化趋势基本相同。模型对于不同处理下的有机碳含量模拟值普遍低于实测值,这可能是模型本身是通过控制碳和氮迁移转化的生物地球化学反应机制来模拟表达,无法捕捉其他

意外自然因素。模型对于覆膜及秸秆覆盖处理下作物产量的模拟值偏高,这可能是由于模型覆盖板块只有时间与比例这两个参数定义覆盖条件下的作物产量,并没有覆盖厚度、覆盖材质等设置选项,定位试验中所设置的长 5~10 cm 秸秆用于覆盖无法在模型中进行体现。事实上,例如地膜厚度、材质等参数,对土壤理化性质、土壤温湿度、作物的生长发育都有显著影响^[37-38]。所以 DNDC 模型在区域应用过程中还有进一步完善和改进的空间。

4 结 论

1) 基于长期定位试验实测数据验证了 DNDC 模型在我国西北旱作农田的适用性。模型模拟的不同覆盖处理下土壤有机碳含量、冬小麦产量与田间观测结果较为一致,利用 DNDC 模型评估不同覆盖处理的固碳增产效果具有可靠性。

2) DNDC 模型模拟结果显示,秸秆覆盖在 50 a 时间尺度上可以有效提高土壤有机碳含量,且土壤有机碳库在第 40~50 年逐渐趋于平衡。地膜覆盖能够提高作物产量,但是长期来看会导致土壤有机碳的消耗,不利于土壤肥力维持。而秸秆覆盖可以在保证冬小麦产量的同时持续增加土壤有机碳含量,其中秸秆全覆盖措施的效果更为显著,是该地区较为理想的栽培方式。

参 考 文 献:

[1] 张萍,李其昫,于磊,等.秸秆覆盖对冬小麦生长状况及产量的影响[J].山东理工大学学报(自然科学版),2008,22(5):48-51.
ZHANG P, LI Q Y, YU L, et al. The influence of the mulching straw on growth and yield of winter wheat[J].Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition), 2008, 22(5): 48-51.

[2] 张振江.麦秸还田培肥土壤增产效应分析[J].干旱地区农业研究, 1991,9(1):52-58.
ZHANG Z J. An analysis of effect of yield increase by returning wheat straw to the fields for soil betterment[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1991,9(1): 52-58.

[3] PLAZA-BONILLA D, ÁLVARO-FUENTES J, CANTERO-MARTÍNEZ C. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices [J]. Soil and Tillage Research, 2014, 139: 19-22.

[4] 杨学明,张晓平,方华军,等.用 RothC-26.3 模型模拟玉米连作下长期施肥对黑土有机碳的影响[J].中国农业科学,2003,36(11): 1318-1324.
YANG X M, ZHANG X P, FANG H J, et al. RothC-26.3 model simulating long-term effects of fertilization on changes of soil organic carbon in continuous cultivation of corn in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(11): 1318-1324.

[5] 张钊,辛晓平.生物地球化学模型 DNDC 的研究进展与碳动态模拟应用[J].草地学报,2017,25(3):445-452.
ZHANG Z, XIN X P. Research progress of biogeochemistry model

DNDC incarbon dynamic modeling[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25 (3): 445-452.

[6] 杨学明.利用农业土壤固定有机碳——缓解全球变暖与提高土壤生产力[J].土壤与环境,2000,9(4):311-315.
YANG X M. Carbon sequestration in farming land soils: an approach to buffer the global warming and to improvesoil productivity[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(4): 311-315.

[7] SMITH P, SMITH J U, POWLSON D S, et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments [J]. Geoderma, 1997, 81 (1/2): 153-225.

[8] 巴特尔·巴克,彭镇华,张旭东,等.生物地球化学循环模型 DNDC 及其应用[J].土壤通报,2007,38(6):1208-1212.
BAKE B, PENG Z H, ZHANG X D, et al. Biogeochemical model DNDC and its application[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(6): 1208-1212.

[9] LI C S. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 58(1/3): 259-276.

[10] GILTRAP D L, LI C S, SAGGAR S. DNDC: a process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils [J]. Agriculture Eco-systems & Environment, 2010, 136(3/4): 292-300.

[11] 杨黎,王立刚,李虎,等.基于 DNDC 模型的东北地区春玉米农田固碳减排措施研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):75-86.
YANG L, WANG L G, LI H, et al. Modeling impacts of alternative farming management practices on carbon sequestration and mitigating N₂O emissions from spring maize fields[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(1): 75-86.

[12] 王梅.重铬酸钾氧化—外加加热法测定土壤中有机碳含量的方法讨论[J].新疆有色金属,2019,42(6):98-99.
WANG M. Discussion on determination of organiccarbon in soil by pot-tassium dichromate oxidation external heating method [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2019, 42(6): 98-99.

[13] 王立为,郭康军,李鸣钰,等.基于 DNDC 模型多因子对马铃薯田 N₂O 排放和产量的影响研究[J].生态环境学报,2019,28(6): 1141-1151.
WANG L W, GUO K J, LI M Y, et al. Research on the effect of multifactor of DNDC model on N₂O emission and yield of potato field [J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, 28(6): 1141-1151.

[14] LI C S, FROLKING S, CROCKER G J, et al. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model [J]. Geoderma, 1997, 81(1/2): 45-60.

[15] 徐文彬,洪业汤,陈旭晖,等.应用 DNDC 模型估算区域农业土壤 N₂O 释放通量和释放量——以贵州省为例[J].环境科学,2000, 21(2):11-15.
XU W B, HONG Y T, CHEN X H, et al. DNDC model estimates of N₂O emission from regional agricultural soils-a Guizhou province case study[J]. Environmental Science, 2000, 21(2): 11-15.

[16] 李长生.土壤碳储量减少:中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究[J].第四纪研究,2000,(4):345-350.
LI C S. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: a comparison on agroecosystem carbon pool in China and the US[J]. Quaternary Sciences, 2000, (4): 345-350.

[17] QIU J J, LI C S, WANG L G, et al. Modeling impacts of carbon sequestration on net greenhouse gas emissions from agricultural soils in China [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(1): 1-16.

[18] 马成泽.不同施肥制度下农田土壤有机质平衡移动的趋势[J].安徽农学院学报,1990,(2):99-104.

- MA C Z. Tendency of organic matter equilibrium in soil under different fertilization systems [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 1990, (2): 99-104.
- [19] 梁贻仓. 不同覆盖方式对旱作农田土壤有机碳及其组分的影响 [D]. 西安: 西北大学, 2014.
- LIANG Y C. Effect of mulching on soil organic carbon and its fractions in rainfed farmland [D]. Xi'an: Northwest University, 2014.
- [20] 张彤勋. 薄膜和秸秆覆盖下旱地土壤碳氮动态及其模拟 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- ZHANG T X. Dynamics of soil carbon and nitrogen and its simulation in dryland mulched by film and straw [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [21] 郑凤君, 王雪, 李生平, 等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应 [J]. 中国农业科学, 2021, 54 (3): 596-607.
- ZHENG F J, WANG X, LI S P, et al. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under no-tillage practice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54 (3): 596-607.
- [22] TOSTI G, BENINCASA P, FARNESELLI M, et al. Green manuring effect of pure and mixed barley-hairy vetch winter cover crops on maize and processing tomato N nutrition [J]. European Journal of Agronomy, 2012, 43: 136-146.
- [23] 赵聚宝, 梅旭荣, 薛军红, 等. 秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响 [J]. 中国农业科学, 1996, 29 (2): 59-66.
- ZHAO J B, MEI X R, XUE J H, et al. The effect of straw mulch on crop water use efficiency in dryland [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1996, 29 (2): 59-66.
- [24] SIX J, CONNANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils [J]. Plant and Soil, 2002, 241 (2): 155-176.
- [25] HUTCHINSON J J, CAMPBELL C A, DESJARDINS R L. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142 (2/4): 288-302.
- [26] 涂纯. 黄土旱塬区不同覆盖措施下冬小麦农田土壤碳动态及其影响因素 [D]. 西安: 西北大学, 2013.
- TU C. Variation in soil carbon and its driving factors in dryland winter wheat field with different mulching measures [D]. Xi'an: Northwest University, 2013.
- [27] 王立刚, 邱建军, 李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究 [J]. 土壤肥料, 2002, (6): 13-17.
- WANG L G, QIU J J, LI W J. Study on the dynamics of soil respiration in the field of summer-corn in Huanghuaihai region in China [J]. Soils and Fertilizers, 2002, (6): 13-17.
- [28] 王翔宇, 丁国栋, 尚润阳, 等. 秸秆、地膜覆盖控制农田土壤风蚀机理 [J]. 安徽农学通报, 2007, 14 (16): 49-50, 57.
- WANG X Y, DING G D, SHANG R Y, et al. Mechanism of controlling wind erosion in farmland by covering straw and plastic film [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, 14 (16): 49-50, 57.
- [29] 洪祖荣. 模拟氮沉降和凋落物组成对柳杉人工林表层土壤有机碳的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- HONG Z R. Response of topsoil organic carbon to simulated nitrogen deposition and litter composition in Cryptomeria fortune plantation [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [30] 官情. 黄土旱塬区不同覆盖措施对冬小麦农田土壤呼吸及作物水分利用效率的影响 [D]. 西安: 西北大学, 2011.
- GUAN Q. Effect of different mulching on soil respiration and water use efficiency in winter wheat field in the drylands of Loess Plateau [D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- [31] 刘宁. 基于 DNDC 模型模拟沟垄覆膜种植对土壤水热及冬小麦产量的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- LIU N. Simulation of rainfall harvesting with ridge and furrow system impacts on soil moisture temperature and yield of winter wheat using DNDC model [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [32] 王晓峰, 田霄鸿, 陈自惠, 等. 不同覆盖施肥措施对黄土旱塬冬小麦土壤水分的影响 [J]. 应用生态学报, 2009, 20 (5): 1105-1111.
- WANG X F, TIAN X H, CHEN Z H, et al. Effects of mulching and fertilization on winter wheat field soil moisture in dry highland region of Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20 (5): 1105-1111.
- [33] 吕晓男, 陆允甫, 卢德生. 覆盖对改善土壤物理性状和春玉米产量影响的研究初报 [J]. 土壤通报, 1994, 25 (3): 102-103.
- LV X N, LU Y F, LU D S. Effects of mulching on improving soil physical properties and spring maize yield [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25 (3): 102-103.
- [34] LI F M, GUO A H, WEI H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat [J]. Field Crops Research, 1999, 63 (1): 79-86.
- [35] 贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 应用 DNDC 模型分析东北黑土有机碳演变规律及其与作物产量之间的协同关系 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (1): 9-19.
- HE M, WANG Y C, WANG L G, et al. Using DNDC model to simulate black soil organic carbon dynamics as well as its coordinate relationship with crop yield [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23 (1): 9-19.
- [36] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展 [J]. 生态学报, 2007, 27 (6): 2642-2650.
- LIU M Q, HU F, CHEN X Y. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (6): 2642-2650.
- [37] 张丹, 王洪媛, 胡万里, 等. 地膜厚度对作物产量与土壤环境的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36 (2): 293-301.
- ZHANG D, WANG H Y, HU W L, et al. Effect of film thickness on crop yield and soil environment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36 (2): 293-301.
- [38] 唐文雪, 马忠明, 魏焘. 不同厚度地膜多年覆盖对土壤物理性状及玉米生长发育的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2017, 36 (12): 36-41.
- TANG W X, MA Z M, WEI D. The effects of continuous mulching with plastic films of different thicknesses on soil physical properties and growth of maize [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36 (12): 36-41.