

DNDC 模型耦合遥感技术的保护性耕作下土壤有机碳模拟

刘泓君^{1,2}, 许昭辉^{1,2}, 周永馨^{1,2}, 孙君龄^{1,2}, 万 炜³, 刘 忠^{1,2*}

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 华北耕地保育农业农村部重点实验室, 北京 100193;
3. 南昌大学资源与环境学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330031)

摘 要: 不同耕作措施会改变土壤有机碳储量, 影响农田生态系统的碳收支。揭示自实行保护性耕作以来农田土壤有机碳的响应规律, 对增加土壤碳库具有重要意义。该研究基于遥感反演技术耦合 DNDC (denitrification-decomposition) 模型, 从县域和栅格尺度, 精细刻画保护性耕作下 2000—2020 年吉林省土壤有机碳密度 (soil organic carbon density, SOCD) 的空间分布格局, 并模拟不同秸秆还田情景下 SOCD 增长潜力。结果表明: 1) 20 a 间土壤有机碳储量由 6.08×10^8 t 增加到 1.22×10^9 t, 增量主要与耕地面积扩大相关。县域尺度 SOCD 在 $4.46 \sim 98.09$ t/hm², 栅格尺度 SOCD 在 $3.34 \sim 139.2$ t/hm², 呈现中高北低的格局。2) 保护性耕作对表层土的影响更大, 0~10 cm 土层的 SOCD 增长率最高达 4.4%, >10~20 cm 土层增长率最高为 0.09%。3) 吉林西南及中部具有巨大的 SOCD 增长潜力, 达 $0.24 \sim 0.57$ t/hm²。研究结果可为保护性耕作政策制定提供科学参考。

关键词: 秸秆; 遥感; 碳; DNDC 模型; 情景模拟; 有机碳密度; 吉林省

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202311189

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-09-0108-11

刘泓君, 许昭辉, 周永馨, 等. DNDC 模型耦合遥感技术的保护性耕作下土壤有机碳模拟[J]. 农业工程学报, 2024, 40(9): 108-118. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202311189 <http://www.tcsae.org>

LIU Hongjun, XU Zhaohui, ZHOU Yongxin, et al. Soil organic carbon simulation under conservation tillage using DNDC model coupled with remote sensing technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(9): 108-118. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202311189 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

土壤是一个巨大的碳库, 存储了 1 500~2 000 Pg 的有机碳^[1]。其中, 农田土壤的碳库容量往往低于自然土壤, 这可能与农田中长期的不合理耕作有关。此外, 秸秆燃烧、农药喷洒和土壤翻耕等农业生产活动会增加土壤呼吸强度, 致使土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 加速分解并释放大量的 CO₂, 加剧全球变暖^[2]。为应对全球气候变化, 中国提出“双碳”战略^[3], 而农田生态系统对中国“双碳”目标的实现具有重要意义。

位于东北核心黑土区的吉林省既是重要的区域性碳库^[4], 也是中国重要的商品粮生产基地^[5]。1980—2020 年间, 由于过度开垦等, 黑土地 SOC 含量减少 64.1%^[6-7], 对生态环境和粮食安全产生了威胁^[8]。以“梨树模式”为代表的保护性耕作技术将玉米收获后的秸秆直接覆盖在土壤表层, 维持土壤肥力并加强土壤固碳^[9]。然而, 关于保护性耕作增加 SOC 潜力及适宜实施保护性耕作的区域和规模, 还缺乏系统性量化研究。

土壤有机碳密度 (SOC density, SOCD) 估算的方法主要包括经验模型 (SOC 与环境因子间的经验关系^[10])、过程模型 (RothC 模型^[11]、DNDC (denitrification-decomposition) 模型^[12]) 以及机制模型 (CENTURY 模型^[13])。其中经验模型建模简单, 但仅反映经验关系, 评估精度有限, 且难以推广至其他区域。机制模型可以全面反映土壤碳循环过程并进行长时间预测。但模型结构复杂, 参数取得和校验困难, 计算量大, 对机制认识要求高。过程模型模拟主要过程的机制, 同时根据实测数据可以调整参数实现本地化, 结果较准确且有较好的区域适宜性。其中, DNDC 模型是一种模拟碳和氮循环的生物地球化学过程模型^[14]。该模型共包含 6 个子模型, 分别用于模拟土壤气候、植物生长、有机质的分解、硝化过程、反硝化过程和发酵过程^[15]。子模型主要用来模拟生态驱动因素引起的植被生长环境动态变化和微生物对碳、氮的转换速率。DNDC 模型能进行点位和区域尺度的模拟^[16]。点位尺度模拟需输入土壤、气象和作物农田管理措施数据。区域尺度需将研究区划分为均质模拟单元, 并对模拟单元建立相应的数据库^[17]。

以往研究中, 学者们常基于县域单元进行模拟, 得到县域平均的 SOCD, 为不同县域的碳管理决策提供依据, 但难以反映细致的空间变异性^[18-19]。或基于栅格尺度模拟 SOCD 空间分布, 虽然空间更精细但难以为决策提供直接的参考^[20-21]。且在 DNDC 模型中通常基于默认

收稿日期: 2023-11-27 修订日期: 2024-02-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD150070101); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (42301091)

作者简介: 刘泓君, 博士生, 研究方向为资源环境遥感。

Email: liuhongjunkeai@cau.edu.cn

*通信作者: 刘忠, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为资源环境遥感。Email: lzh@cau.edu.cn

经验设定整片区域统一的秸秆覆盖度,难以对每个模拟单元的不同秸秆覆盖度进行精准模拟^[22]。截至目前依然缺少区域尺度 SOCD 高精度的时空变化及不同秸秆覆盖下的土壤固碳潜力研究。

因此,本研究将 DNDC 模型与秸秆反演相结合进一步提升吉林省农田 SOCD 估算精度,从县级和栅格(1 km×1 km) 2 个尺度,精细刻画 2000—2020 年吉林省农田 SOCD 的时空演变格局,系统探究长期保护性耕作下的吉林省农田 SOCD 的时空演变特征及提升潜力和不同秸秆还田比例对 SOC 的影响,以期吉林省制定合理的农田耕作管理措施、土壤质量改良及固碳策略提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吉林省位于东北地区的中部(40°~46°N, 121°~131°E), 占地面积约 18.74 万 km²。吉林属于温带季风气候, 年平均气温 4.2 °C, 东南部山地气温相较于西南

部平原地区低, 自东向西逐渐递增。年平均降水量为 560 mm, 平原地区降水较山地少, 整体呈现从西北向东南逐渐递增的趋势^[23]。公主岭试验站(43°55'N, 125°63'E)(图 1a), 海拔 220 m, 是典型黑土区, 年平均气温 5.6 °C, 年降水量在 450~550 mm 之间, 有效积温 2 600~3 000 °C, 无霜期 130~140 d。试验站能为点位模拟提供实测数据支持, 实现 DNDC 模型参数本地化, 为后续吉林省县域和栅格尺度的 SOCD 模拟提供准确的基础。

吉林省从 20 世纪 90 年代中期开始推广保护性耕作, 主要采用高留茬覆盖、秸秆还田、免耕播种、轮作、间作等技术。截至 2022 年, 吉林省保护性耕作技术推广面积 218.98 万 hm², 主要集中在长春平原、松嫩平原等玉米主产区。在保护性耕作中, 秸秆覆盖面积约 124.53 万 hm², 主要是玉米秸秆覆盖。吉林地处世界黄金玉米带, 玉米秸秆资源丰富, 具有较强的代表性^[24]。对此区域的研究可以了解保护性耕作在土壤固碳上的潜力, 并为后续因地制宜实施保护性耕作提供参考。

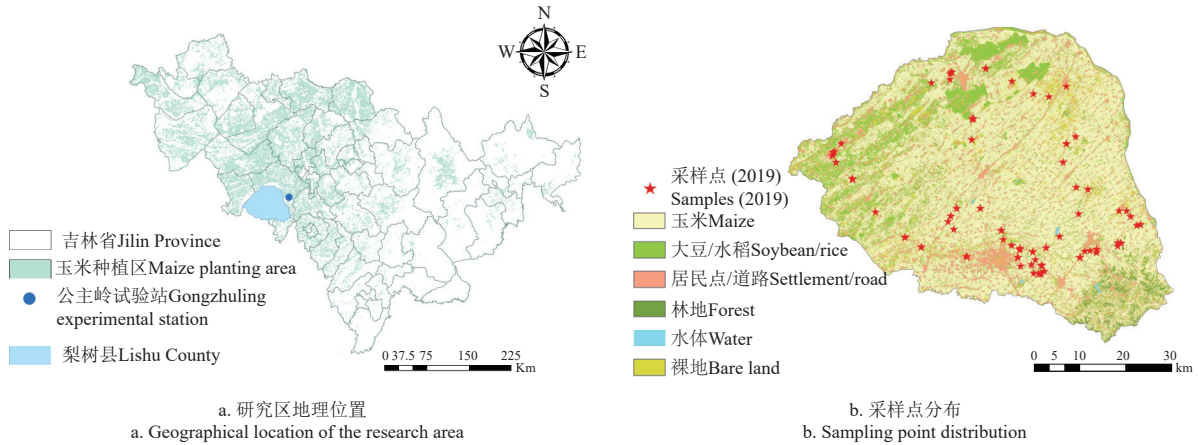


图 1 研究区及试验站点分布图
Fig.1 Map of the study area and experimental sites

1.2 数据获取与预处理

1.2.1 遥感影像数据

吉林省 2000、2005、2010、2015、2020 年的 Landsat 遥感影像数据, 来自美国地质调查局(USGS), 用于秸秆覆盖度的反演。2000 年数据为 Landsat-7 ETM+, 2005 年和 2010 年数据为 Landsat-5 TM, 2015 年和 2020 年数据为 Landsat-8 OLI。影像获取限定条件: 1) 卫星过境的时间须为休耕期; 2) 耕地无积雪覆盖; 3) 影像的云量须小于 10%。在进行定量遥感反演前, 对影像进行了辐射定标、FLAASH 大气校正、图像镶嵌和裁剪等预处理。

1.2.2 实地观测数据

SOC 实测数据与土壤属性数据均来自吉林省公主岭市长期定位试验数据, 用于 DNDC 模型的参数标定。试验站点提供不施肥以及单施化肥 2 种农田管理措施下 SOCC。单施化肥下 N、P₂O₅、K₂O 的施肥量分别为 165、82.5、82.5 kg/hm²。土壤容重(1.19 g/cm³)、有机碳(13.2 g/kg)、pH 值(7.6)、田间持水量(35.8%)、孔隙度(53.4%)、黏粒(41%)、全氮(1.4 g/kg)、

有效磷(11.8 mg/kg)、有效钾(158.3 mg/kg)。本研究于 2019 年 5 月 11 日(玉米播种初期如图 1b)在玉米主产区采用拉绳法获取秸秆覆盖度实测数据, 采样样本 70 个, 用于秸秆覆盖度的反演与精度验证。

1.2.3 区域模型数据

研究主要使用 1 km 土壤数据(<https://www.fao.org/soils-portal/>)、1 km DEM 数据(<https://www.resdc.cn/>)、行政区划数据(<https://www.webmap.cn/main.do?method=index>)、作物数据和管理措施数据(吉林省统计年鉴)、玉米作物种植分布数据集(<http://www.nesdc.org.cn/>)、气象数据(<http://data.cma.cn>)等, 用于 DNDC 模型的数据输入与精度验证。

1.3 研究方法

1.3.1 秸秆覆盖度反演模型

纤维素-木质结构在 2 100 nm 处的短波红外光谱上可以形成一个强的吸收谷^[25]。基于作物秸秆的这一特性, 引入归一化差值耕作指数(normalized difference tillage index, NDTI)^[26], 来反演秸秆覆盖度(crop residue

coverage, CRC):

$$I_{\text{NDTI}} = \frac{\rho_{\text{SWIR1}} - \rho_{\text{SWIR2}}}{\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{SWIR2}}} \quad (1)$$

式中 I_{NDTI} 指归一化差值耕作指数; ρ_{SWIR1} 和 ρ_{SWIR2} 分别是 Landsat-5 TM 或者 Landsat-7 ETM+ 的第五波段和第七波段的反射率, 或者是 Landsat-8 OLI 的第六波段和第八波段的反射率。

1.3.2 DNDC 模型

DNDC 模型点位尺度的模拟需要输入公主岭试验站实测数据, 包括土壤、气象和作物农田管理数据。区域尺度模拟则需要先将研究区划分为均质模拟单元, 并对模拟单元赋予唯一的标识符并建立相应的数据库。该数据库包括气象信息 (日降水量、气温); 土壤信息 (有机碳含量、pH 值、容重等); 农田管理措施信息 (作物类型、播种收获时间等)。DNDC 模型通过识别该标识符读取模拟单元的数据库信息, 实现县级尺度的 SOCD 模拟。区域尺度模拟结果可得到研究区模拟单元 0~50 cm 的 SOCD, 由于 0~20 cm 土层是土壤最活跃的有机碳储存和转换层, 且表层有机碳的时空变异规律可以说明土壤碳汇功能和碳循环过程。因此, 本研究仅对 0~20 cm 土层的 SOC 展开研究, 并通过式 (2)~式 (3) 计算 SOCD 与土壤有机碳储量 (soil organic carbon storage, SOCS) [27]:

$$D = \sum_{i=1}^{n_i} (0.1 O_i \cdot B_i \cdot P_i) \quad (2)$$

$$S = \sum_{j=1}^m (D_j \cdot A_j) \quad (3)$$

式中 D 指土壤有机碳密度, kg/hm^2 ; O_i 是第 i 层的土壤有机碳, g/kg ; B_i 指第 i 层的土壤密度, g/cm^3 ; P_i 是第 i 层的深度, cm ; n_i 指模拟单元的层数; S 指土壤有机碳储量, t ; A_j 指第 j 个模拟单元的面积, m^2 , m 指模拟单元的个数。

1.3.3 粮食产量栅格化

从吉林省统计年鉴中获取 2000—2020 年玉米总产量和播种面积, 将获取的县域尺度的玉米产量与玉米播种面积相除, 得到单位播种面积的玉米产量。为将统计数据转换为栅格尺度数据用于后续模型精度验证, 采用粮食产量栅格化方法, 进而得到研究区 1 km 分辨率的玉米单位面积产量的栅格数据[28], 操作流程如图 2 所示。

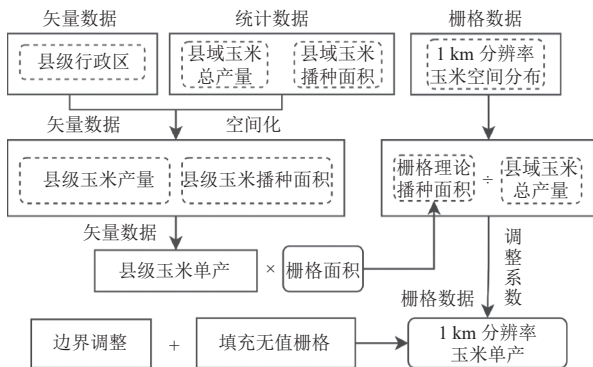


图 2 粮食产量栅格化流程

Fig.2 Grain yield rasterization process

1.3.4 模型精度验证

采用决定系数 (R^2), 相对均方根差 (relative root mean square errors, RRMSE)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 3 个指标来表征 DNDC 模型的模拟效果[29]。

1.3.5 情景模拟

为探讨吉林省 20 a 间实施保护性耕作对 SOC 的影响及土壤固碳潜力, 根据美国环保技术信息中心对保护性耕作的定义, 将 CRC 低于 15% 的耕作方式定义为传统耕作 (IT), CRC 在 15%~30% 间的耕作方式定义为少耕 (RT), 而 CRC 高于 30% 的耕作方式定义为保护性耕作 (NT)。在发达国家的秸秆还田措施中, 美国秸秆直接还田量占秸秆总产量的 68%。英国秸秆直接还田量占秸秆总产量 73%[30]。而中国农业农村部要求作物秸秆综合利用率需保持在 86% 以上[31]。假设收割后的秸秆全量还田下, 秸秆覆盖率为 100%, 则秸秆综合利用率等于还田比率等于秸秆覆盖度。参考以上秸秆设置情况, 为探究保护性耕作对 SOC 提升的潜力, 以 2020 年为基准, 设置了 CRC 依次提高至 30% (情景 I)、70% (情景 II)、86% (情景 III)、100% (情景 IV) 4 个场景。具体说明如下: 模拟单位中 $\text{CRC} < 30\%$ 的区域, 设置 $\text{CRC} = 30\%$; 现实情况 $\text{CRC} \geq 30\%$ 的区域保持不变, 其他各情景设定同理。CRC 为 30% 为探讨对传统耕作区实行免耕技术后的固碳潜力; CRC 为 70% 为探讨参考发达国家秸秆覆盖度设置下的固碳潜力; CRC 为 86% 探讨在政策制定下的固碳潜力; CRC 为 100% 为假理想情况, 目的是探讨秸秆全量还田 SOC 可能饱和的情况。在上述 4 种秸秆还田量提高的情景下, 对低于 CRC 情景设计值的区域重新进行模拟, 得到 SOC 增长潜力。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖度反演及 DNDC 模型精度验证

2.1.1 秸秆覆盖度反演结果空间分布

遥感图像预处理后, 运用 NDTI 公式进行计算, 得到 NDTI。利用 NDTI 指数与实测秸秆覆盖度进行拟合, 构建了基于 NDTI 指数与 CRC 间的反演模型 (图 3), 二者显著线性相关 ($R^2=0.63$, $P<0.01$)。研究表明 NDTI 指数反演 CRC 精度较高[32-33], 可以作为评估秸秆覆盖效果的重要指标。

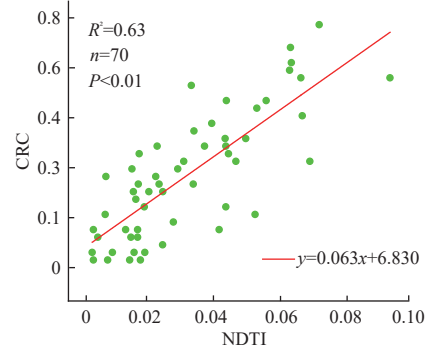


图 3 秸秆覆盖度与归一化差值耕作指数的关系

Fig.3 Relationship between crop residue coverage (CRC) and normalized difference tillage index (NDTI)

基于反演模型，2000—2020 年吉林省玉米种植区 CRC 的空间分布如图 4，CRC 为 2.8%~79.2%。为验证反演精度，本研究按照随机分布及梯度差异原则选取吉林省遥感影像中有秸秆覆盖的若干地块，用秸秆覆盖面积除以地块总面积获取 CRC 验证数据，分类精度达 89.98%，表明本研究反演得到的 CRC 数据可靠，

适用于后续研究。由图 4 可知，2000—2020 年，吉林省玉米种植面积不断扩大，由 $2.26\times10^6\text{ hm}^2$ 增长到 $4.32\times10^6\text{ hm}^2$ ，增长了 $2.06\times10^6\text{ hm}^2$ 。CRC 也逐年扩大，2000 年时秸秆还田量较低，CRC 在 2.8%~30%。至 2020 年，CRC 为 13%~79.2%，从低量分散到各区域覆盖度均有所提高。

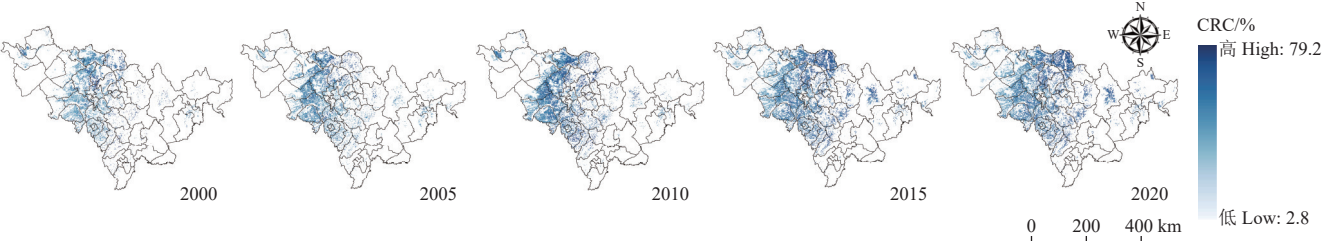


图 4 2000—2020 年吉林省玉米种植区 CRC 空间分布
Fig.4 Spatial distribution of CRC in maize planting areas of Jilin Province from 2000 to 2020

2.1.2 DNDC 模型模拟精度验证

对 DNDC 模型进行参数标定，标定后各参数取值：萎蔫点（38.5%）、饱和导水率（0.118 m/h）、隔水层深度（9.99 m）、土壤碳/氮含量比值（10.09）。容重、酸碱度、黏粒含量、田间持水量、有机碳含量等保持不变。基于吉林省公主岭市的长期试验站点定位数据，利用 DNDC 模型进行点位尺度模拟，得到试验站点在 2 种不同农田管理措施下 SOCC 变化情况。与实测值进行对比，结果如图 5 所示。

20 a 间，不施肥情况下，土壤 SOCC 较低且呈现下降趋势，比 2000 年降低了 5.13%。单施化肥情况下，土壤 SOCC 也呈现下降趋势，比 2000 年降低了 3.25%。施用化肥后土壤 SOCC 下降率减小了 1.88 个百分点，表明施用化肥能够有效减缓 SOCC 的损失。不同农田管理措施下模拟值和实测值的相关性达到了显著水平，RRMSE 均小于 10%，模型拟合效果较好，证明率定后的 DNDC 模型在吉林省模拟 SOCD 具有可行性。

为满足 DNDC 模型在栅格尺度的模拟需求，将粮食产量统计数据栅格化并与模拟结果进行比较。2000—2020 年吉林省玉米单产空间分布上呈现从中部地区向西北和东南两侧逐渐下降的规律。西部和东部地区的作物生长条件相对匮乏，从而导致玉米单产相对较低（图 6a）。DNDC 模型模拟 2000—2020 年作物单产分布情况同由统计年鉴栅格化后得到的结果相一致，玉米单产的极高值主要分布在梨树县和公主岭市（图 6b）。

2000—2020 年作物产量模拟值与实测值如表 1 所示：二者间 R^2 为 0.63~0.74，RRMSE 为 20.01%~28%，可见，虽然模型对产量的预测存在一定误差，但模拟实测值间具有较好的线性相关关系，模拟效果良好，基于栅格尺度 DNDC 模型能较准确地预测产量。由区域模拟结果同时输出的作物单产与 SOCD 均具有一定的可靠性。

表 1 2000—2020 年作物产量模拟值与实测值拟合效果
Table 1 Effect of fitting the simulated and measured values of crop yields in 2000—2020

年份 Year	MAE/ (kg·hm ⁻²)	RRMSE/%	R ²	r
2000	2.21	23.86	0.73	0.856**
2005	2.19	22.02	0.74	0.853**
2010	2.16	28.00	0.63	0.790**
2015	2.18	20.01	0.73	0.854**
2020	2.17	20.33	0.64	0.797**

注 (Note): **, $P<0.01$ 。

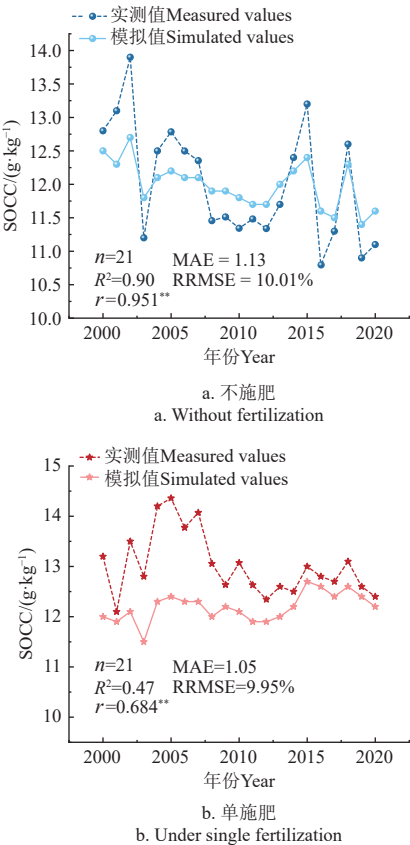


图 5 不同农田管理措施下土壤有机碳含量模拟值与实测值
Fig.5 Simulated and measured soil organic carbon content (SOCC) under different farmland management measures

2.2 县域和栅格尺度土壤有机碳时空动态

将遥感反演后的 CRC 取县域均值应用于校正后的 DNDC 模型，得到吉林 SOCD 的年际变化（图 7a）：2000—2020 年不同区县 SOCD 在 4.46~98.09 t/hm²，

SOCD 均值从 57.39 t/hm² 增至 65.18 t/hm², 共增加 2.68 t/hm²。2000—2015 年 SOCD 增长较迅速, 而之后增长变缓。20 a 间 SOCS 从 6.08×10⁸ t 增加到 1.22×10⁹ t, 增加了 6.12×10⁸t, 增量主要与耕地面积扩大相关。SOCD

整体呈现中高北低的空间分布格局。西部公主岭、梨树县与辽源市, 东部榆树市、舒兰市 SOCD 较高, 西北白城的洮南市及长春市较低。延边朝鲜族自治州等地虽然耕地分布稀少, 但却含有较高的 SOCD。

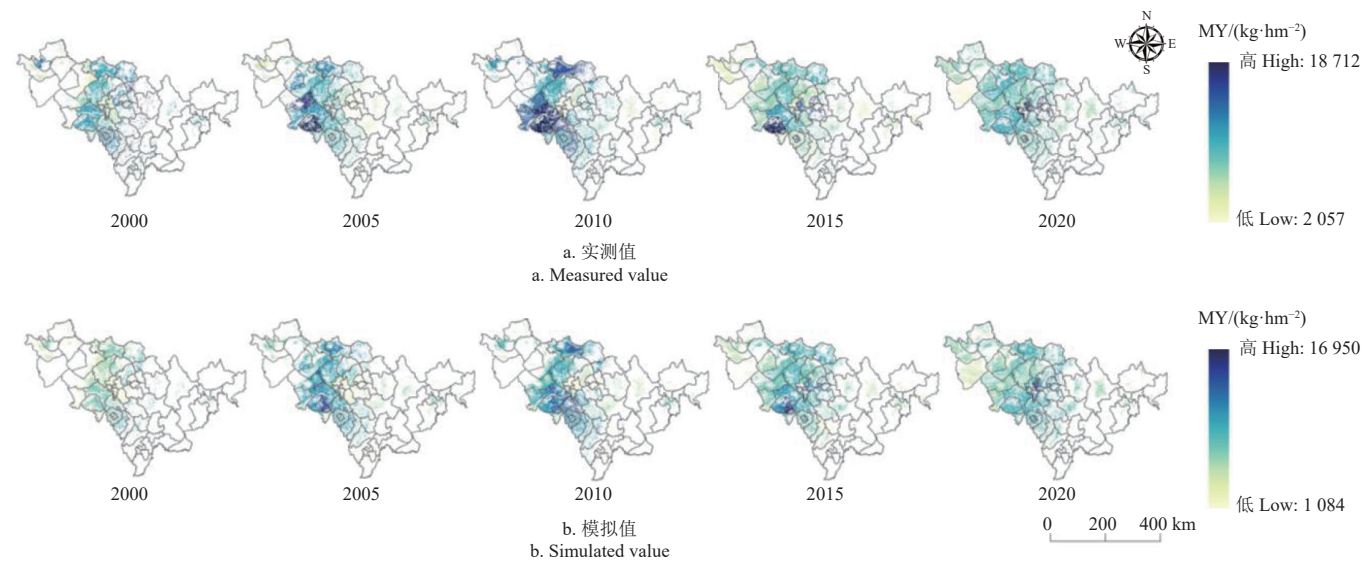


图 6 2000—2020 年吉林省玉米单产实测值与模拟值空间分布
Fig.6 Spatial distribution of measured and simulated maize yield values in Jilin Province from 2000 to 2020

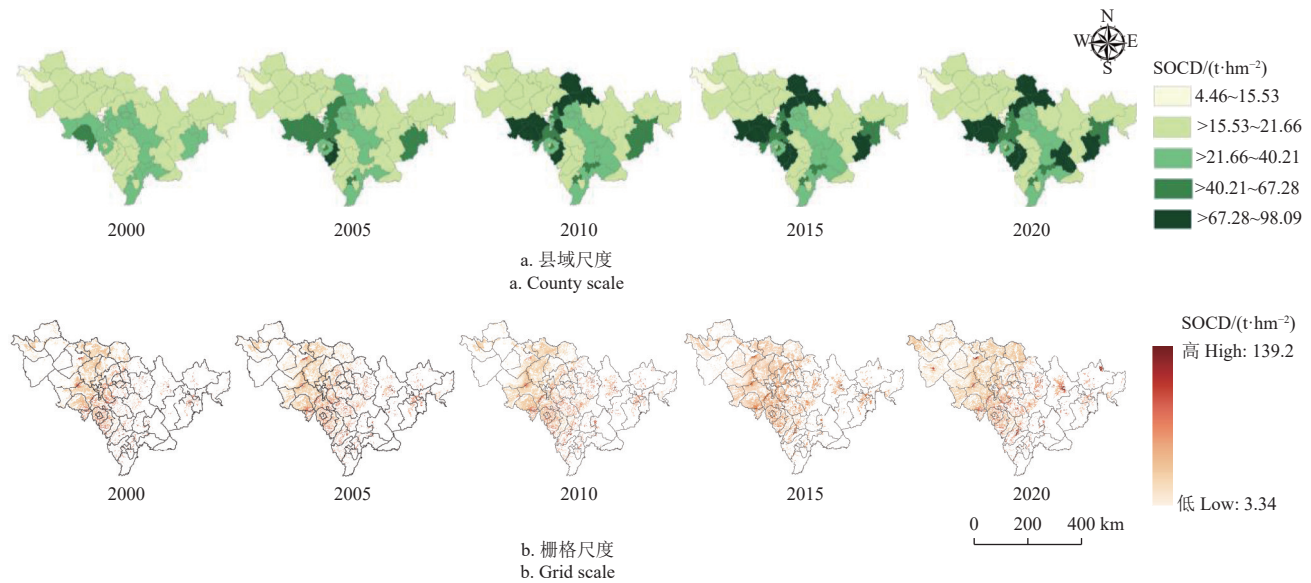


图 7 2000—2020 年吉林省县域和栅格尺度土壤有机碳密度时空分布
Fig.7 Temporal and spatial distribution of soil organic carbon density (SOCD) at county and grid scales in Jilin Province from 2000 to 2020

将遥感反演的 CRC 作为 DNDC 模型的残茬管理参数, 得到栅格尺度不同土壤深度 SOCD 时空动态 (表 2), 20 a 间不同土层深度的 SOCD 呈先增加后减少

再增加的趋势。0~10 和 0~20 cm 土层深度的 SOCD 值增长幅度较大, >10~20 cm 增长幅度微小。可见土壤表层有机碳对田间管理措施响应更为明显。

表 2 2000—2020 年不同土壤深度下土壤有机碳密度的模拟结果					
Table 2 Simulation results of soil organic carbon density at different soil depths from 2000 to 2020					
土壤深度 Soil depth/cm	2000	2005	2010	2015	2020
0~10	1.68~68.77	1.80~68.91	1.78~69.20	1.76~68.86	1.77~68.88
>10~20	1.66~69.71	1.75~69.80	1.73~70.00	1.70~69.73	1.71~69.75
0~20	3.34~138.48	3.55~138.71	3.51~139.20	3.46~138.59	3.48~138.63

与县域相比, SOCD 栅格尺度空间分布更为精细 (图 7b): SOCD 在 3.34~139.2 t/hm², 其空间异质性

更加明显。不同时期吉林省 SOCD 皆呈现东南向西北逐渐降低的格局，东南地区由于年降水量高，SOCD 高，但耕地稀少。西南部的四平与公主岭的耕地 SOCD 次之，该地土壤多为典型黑土，腐殖质含量较高。北部的松原和通榆，耕地 SOCD 较低，与此地分布着少量风沙土且土壤盐碱化有关。

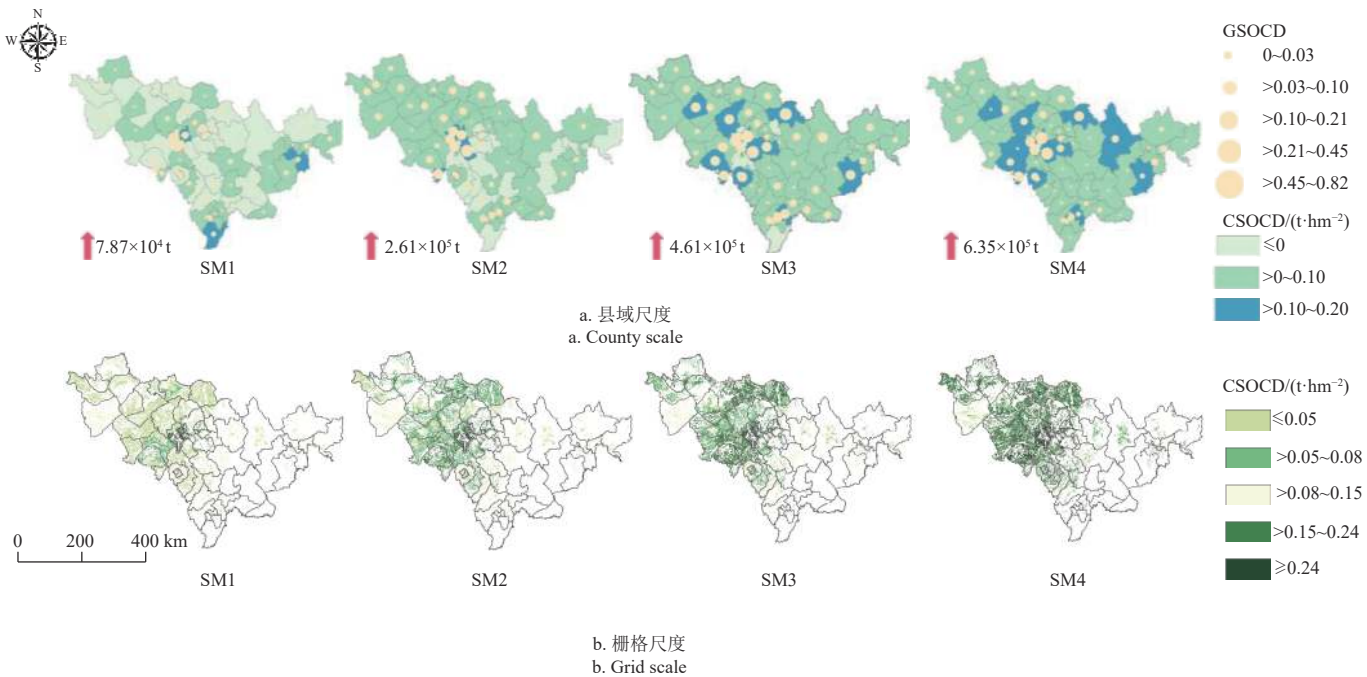
2.3 县域和栅格尺度保护性耕作下土壤有机碳增长潜力

4 种情景下县域尺度吉林省 SOCD 的增长潜力如图 8a。随着 CRC 的提高，情景 I 下 SOCD 增长 7.87×10^4 t，长春市、通化市和龙井市的 SOCD 呈增加态势。情景 II 增长 2.61×10^5 t，四平市铁东区、长春市中心的 SOCD 变化量及增长率较大。情景 III 增长 4.61×10^5 t，梨树县、舒兰市等地区增量较大，变化量大的区域增长率也较大。情景 IV 增长 6.35×10^5 t，农安县、乾安县等地区的 SOCD 增量较大，但某些变化大的区域增长率却较小，如梨树县、辽源市与农安县，SOCD 涨幅在 $0.02\sim0.19$ t/hm²，增长率在 0.01%~82%。提高 CRC 后，SOCD 增量从高到低依次为永吉县、乾安县、梨树县、农安县、公主岭市；SOCD 增长率从高到低依次为榆树市、舒兰市、永吉县、敦化市、梨树县。研究发现吉林西南及中部地区具有较

大的 SOC 增长潜力。

模拟不同情景模式下 2020 年不同土壤深度的 SOCD，如表 3 所示。在 0~10 cm 土层深度下，随着 CRC 的增加，SOCD 也随之增加，增长率最高可达 4.4%。在>10~20 cm 土层深度下，CRC 对 SOCD 影响微小，增长率最高仅 0.09%，CRC 达到 86% 后，SOCD 甚至有微小的减少。但整体上 CRC 的增加会对 0~20 cm 土层 SOCD 积累有促进作用。CRC 可以促进土壤碳汇功能的提升，且对表层土壤碳汇影响更大。

不同情景模式下 0~20 cm 土层深度的 SOCD 栅格尺度空间增长潜力（图 8b）。实施保护性耕作后耕地的 SOCD 皆呈增加趋势，其中从梨树县到长春市中部 SOCD 的增量较大，达 $0.24\sim0.57$ t/hm²，表明这些地区提升 CRC 后对 SOCD 的积累效果最明显。西北部 and 东部增量在 $0.08\sim0.15$ t/hm²，说明这些地区提升 CRC 后对 SOCD 的影响较小。而随着 CRC 的增加，SOCD 增量较大的区域不断扩大。农安县、榆树市、德惠市、梨树县和辽源市等地的 SOCD 具有较大的增长潜力。值得注意的是，通榆县、桦甸市及朝鲜延边自治州等地 SOCD 呈微小增加。



注：图中 SM1~SM4 分别代表情景 I 到情景 IV，图 a 中箭头及数值表示吉林省在不同情景下提升的有机碳储量。
Note: SM1 to SM4 in the figure represent scenarios I to IV, arrows and numerical values in Fig. a represent the increased organic carbon storage in Jilin Province under different scenarios.

图 8 不同情景模式下县域和栅格尺度土壤有机碳密度变化量和增长率空间分布
Fig.8 Change (CSOCD) and growth rate (GSOCD) of SOCD at the at county and grid scales under different scenario modes (SM)

表 3 不同秸秆覆盖度情景下不同土壤深度 SOCD 的模拟结果
Table 3 Simulation results of SOCD in different soil depths under different CRC scenarios (t·hm⁻²)

土壤深度 Soil depth/cm	SM1	SM2	SM3	SM4
0~10	1.80~68.92	1.88~69.01	1.91~69.05	1.95~69.10
>10~20	1.71~69.75	1.71~69.75	1.71~69.75	1.71~69.74
0~20	3.51~138.67	3.59~138.76	3.62~138.80	3.66~138.84

3 讨论

3.1 土壤有机碳密度和碳储量

土壤有机碳动态变化机制复杂，长期以来其研究面临尺度小、时间跨度短、影响因素难以确定等诸多瓶颈^[34]。本研究使用遥感技术进行大面积、长时间序列的 CRC 定量反演，提高了研究的时效性。将反演结果作为

模型输入参数,精细刻画了 20 a 间吉林省 SOCD 时空演变格局。结果显示,在保护性耕作推广下,栅格尺度下 SOCD 在 $3.34 \sim 139.2 \text{ t/hm}^2$,与以往研究报道的 SOCD 在 $25 \sim 125 \text{ t/hm}^2$ 相比(表 4),最高值基本相当,最低值偏低。县域尺度下 SOCD 在 $4.46 \sim 98.09 \text{ t/hm}^2$,与以往研究所报道的县域 SOCD 在 $42.6 \sim 95.1 \text{ t/hm}^2$ 相比,最低值偏低,可能因为本研究将区也作为县域模拟单元,而一些区位于吉林市中心,主要为建设用地,导致这些区模拟值低。

表 4 吉林省土壤有机碳密度估测结果汇总

Table 4 Summary of soil organic carbon density estimation results in Jilin province

年份 Year	有机碳密度 Soil organic carbon density/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	参考文献 References
2010	39~44	[35]
2011	34.36	[36]
2023	25~125	[37]
2023	42.6~95.1	[38]

时间尺度上,20a 间 SOCD 呈先增加后减小再增加的变化趋势。由于 2010 年前大量化肥的使用^[39],导致不稳定 SOC 输入大于 SOC 分解,SOCD 呈上升趋势;而 2010—2015 年由于之前化肥的使用导致土壤酸化加剧^[40],不稳定 SOC 分解加剧,SOCD 减少。DOU 等研究中得出公主岭连续 25 a 施用无机肥 SOCD 未增加,原因是不稳定的 SOC 分解大于等于化肥直接输入的碳,造成土壤 SOCD 并未增加^[41]。而自 2015 年《全国农业可持续发展规划(2015—2030 年)》政策出台后,由于秸秆还田的实施^[42],玉米地 SOCD 又有所上升。这与石艳香等^[43]得出少量化肥配合秸秆还田可以提高 SOC 的结论一致。故秸秆还田措施对 SOC 增加具有重要意义。

为排除其他因素对 SOC 增量的影响,本研究设置不同 CRC,探究 SOC 的增长潜力。研究发现随着 CRC 的增加,吉林西南及中部地区 SOCD 增长潜力较大,与该区域土壤类型以典型黑土为主,具备固碳的优势^[44];而通榆县由于土壤存在盐碱化问题,抑制了微生物的活性,降低了秸秆的分解速率,所以 SOCD 提升潜力低^[45]。长白山脉附近则因较低的温度抑制了微生物对秸秆的分解作用,导致秸秆腐烂速度变慢,降低 SOCD 积累^[46]。所以这些地区除了直接在土地上投放大量秸秆外还需配合其他措施,提高秸秆分解速率。

此外,0~10 cm 土层深度的 SOCD 增长幅度可达 4.4%,10~20 cm 增长幅度最高仅有 0.09%。综上,CRC 对 SOCD 的增量的影响较小,并且对土壤表层 SOC 作用明显。ZHENG 等^[47]也提出免耕对 0~10 cm 深度 SOC 累积明显并随着土层深度的增加而减弱。因此,秸秆还田对农田 SOC 的影响缓慢且深远^[48],但由于作用时间的滞后性,目前研究结果显示仅提高 CRC 对 SOCD 提升潜力作用微小,探究未来长期秸秆还田情况下 SOC 的变化将对优化秸秆还田技术具有宏观指导意义。

3.2 不确定性分析

DNDC 模型对 SOC 的刻画相对简单,未充分考虑 SOC 的多源性、机理的复杂性,导致模拟结果的不确定性。首先,DNDC 模型根据灌溉或非灌溉、最敏感土壤因子最大值或最小值进行组合,产生 4 种不同的土壤-灌溉组合情境。而这 4 种情景涵盖了由不同灌溉措施和土壤性质产生的不确定性^[49]。而本研究主要采取灌溉与最敏感土壤因子最大值组合,未考虑不同区域灌溉与土壤的异质性措施。同时,研究难以获取不同试验站点的长时间观测数据,本文未能考虑不同区域气候差异,修改每年准确的气象与管理参数,部分参数由模型参数间接推算获得。未来研究中可以收集不同站点多年实验数据并按照气象进行区块划分,以进一步提高模型模拟精度。

其次,本文基于公主岭观测站点实测数据对模型中的参数进行了校准,模拟了 2005—2012 年 2 种不同农田管理措施下的 SOCC 变化情况,并将模拟结果与实际观测值进行拟合,模拟精度较好(RRMSE $\leq 10\%$)。然而,由于本研究模拟的时间跨度较长并且空间范围大,仅使用田间数据进行模型的站点校正会带来较大的不确定性。因此,为表明研究的合理性,研究结合 2000—2020 年间吉林省统计年鉴中的玉米产量实测值与模拟值进行精度验证($0.63 \leq R^2 \leq 0.74$, $P < 0.01$, $20.01\% \leq \text{RRMSE} \leq 28\%$),结果表明模型精度较好,校正后的 DNDC 模型能够较为准确表征吉林省农田 SOCD 空间分布格局。今后将在吉林省进行均匀采样获取 SOCD,进一步验证模型结果的准确性。

此外,本研究中县域模拟使用的土壤属性数据存在以下两个限制:一是数据来源于 HWSD 全球土壤数据库,该数据时效性和分辨率都较差。未来获取时效性更新及分辨率更高的土壤数据将提高 SOCD 模拟精度。二是 DNDC 模型模拟假设每个县域单元内土壤属性均匀,掩盖了土壤异质性特征。为提高模拟精度,本研究将 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的栅格作为模拟单元,能够更加精细表征每个格网内土壤属性的空间异质性,而不是简单假设其均质分布。

3.3 秸秆还田潜力及土壤有机碳饱和

虽然秸秆的腐烂分解过程同时也伴随 CO_2 的释放,但投放适量的秸秆可以使土壤固碳量超过秸秆分解释放的 CO_2 量,从而增强土壤碳汇^[50]。为证实农田碳汇效应与 CRC 间的关系,本研究探究了增加 CRC 对不同地区 SOC 的提升潜力。研究发现在不同的 CRC 下,SOCD 分别增长 7.87×10^4 、 2.61×10^5 、 4.61×10^5 和 $6.35 \times 10^5 \text{ t}$,即当 CRC 为 70% 时,SOCD 明显增加。因此需要确保一定比例的 CRC,可以取得增强 SOC 更好的效果^[51]。ZHU 等^[52]的研究得出当玉米地的 CRC 达到 50% 时能迅速分解从而增强 SOC。LI 等^[53]研究表明每年应投放适量秸秆使土壤中的碳输入最低量在 4.07 Mg/hm^2 ,才可以维持土壤碳库的收支平衡。ZOU 等^[54]表明施用 800 kg/hm^2 秸秆对提高土壤微生物活性和 SOC 最有效。若继续提高 CRC 至 100% 时,本研究模拟结果并未显示 SOC 达到饱

和效应的情况,这个现象需要从模型和土壤碳动态两方面做进一步的研究。过量的 CRC 会使 SOC 累积速率显著下降^[55]。因为过高的 CRC 则会抑制土壤微生物活性,降低了秸秆腐解效率。

综上,在吉林省的大部分地区,CRC 在 70%~86% 间较适宜,既考虑了有机质输入量,也兼顾了微生物分解作用,从而发挥最大的碳汇效益。而 CRC 对 SOCD 提升不显著的地区主要是通榆县和长白山脉周围地区,适合大规模秸秆覆盖的地区则主要集中在吉林西南及中部地区。总之,过去几十年农田管理措施的改进提高了吉林耕地 SOC,未来吉林农田生态系统仍具有较大的固碳潜力,但保护性耕作技术的推广仍需要因地制宜,在秸秆覆盖度设置以及秸秆综合化利用上尤其需要结合当地的实际情况。

4 结 论

本研究应用遥感反演耦合 DNDC 模型,从县域和栅格 2 个尺度模拟了 2000—2020 年保护性耕作下吉林省玉米地土壤碳密度 (soil organic carbon density,SOCD) 的时空分布规律及其增长潜力。结果表明:

1) 2000—2020 年吉林省玉米种植面积增长了 $2.06 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。秸秆覆盖度逐年扩大,2000 年秸秆覆盖度为 2.8%~30%,2020 年秸秆覆盖度在 13%~79.2%,从低量分散到各区域 CRC 均有所提高。

2) 2000—2020 年不同区县的 SOCD 为 4.46~98.09 t/hm²,栅格尺度下 SOCD 为 3.34~139.2 t/hm²,20 a 间增长 $6.12 \times 10^8 \text{ t}$,SOCD 呈现中部高,西北低的空间分布格局。

3) 不同秸秆还田情景下,秸秆覆盖度对 0~10 cm 表层的 SOCD 提升明显。吉林西南及中部地区具有较大的 SOCD 增长潜力,达 0.24~0.57 t/hm²,而通榆县和长白山脉等地 SOCD 增长不显著。

【参 考 文 献】

- [1] 徐英德. 基于保护性农业的土壤固碳过程研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(4): 658-670.
XU Yingde. Conservation agriculture-mediated soil carbon sequestration: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 658-670. (in Chinese with English abstract) Chinese Journal of Eco-Agriculture,
- [2] 李园园, 郝长军, 薛彩霞, 等. 陕西省保护性耕作净碳汇的时空演变及差异性分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23): 123-132.
LI Yuanyuan, XI Changjun, XUE Caixia, et al. Spatiotemporal evolution and difference analysis of net carbon sinks under conservation tillage in Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(23): 123-132. (in Chinese with English abstract)
- [3] 符海月, 吴树东, 姜朋辉. 中国粮食主产区耕地绿色低碳利用转型指数构建及分区[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23): 238-246.
FU Haiyue, WU Shudong, JIANG Penghui. Index and zoning for green and low-carbon transition of cultivated land utilization in main grain-producing areas of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(23): 238-246. (in Chinese with English abstract)
- [4] 崔宁波, 王胜男. 粮食安全背景下东北典型黑土区耕地压力动态变化及趋势分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 220-230.
CUI Ningbo, WANG Shengnan. Dynamic change and trend analysis of cultivated land pressure in typical black soil areas of Northeast China under food security[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(21): 220-230. (in Chinese with English abstract)
- [5] 韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研展展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1341-1358.
HAN Xiaozeng, ZOU Wenxiu. Research Perspectives and Footprint of Utilization and Protection of Black Soil in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1341-1358. (in Chinese with English abstract)
- [6] 汪景宽, 徐香茹, 裴久渤, 等. 东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 695-701.
WANG Jingkuan, XU Xiangru, PEI Jiubo, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 695-701. (in Chinese with English abstract)
- [7] WANG S, ZHAO Y, WANG J, et al. Estimation of soil organic carbon losses and counter approaches from organic materials in black soils of northeastern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(3): 1241-1252.
- [8] 郭孟洁, 李建业, 李健宇, 等. 实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 108-118.
GUO Mengjie, LI Jianye, LI Jianyu, et al. Changes of soil structure and function after 16-year conservation tillage in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(22): 108-118. (in Chinese with English abstract)
- [9] 贾洪雷, 马成林, 李慧珍, 等. 基于美国保护性耕作分析的东北黑土区耕地保护[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 28-34.
JIA Honglei, MA Chenglin, LI Huizhen, et al. Tillage soil protection of black soilzone in northeast of China based on analysis of conservation tillage in the United States[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 28-34. (in Chinese with English abstract)
- [10] ZHANG Z, DING J, ZHU C, et al. Bivariate empirical mode

- decomposition of the spatial variation in the soil organic matter content: A case study from NW China[J]. *Catena*, 2021, 206: 105572.
- [11] WANG J, LU C, XU M, et al. Soil organic carbon sequestration under different fertilizer regimes in north and northeast China: RothC simulation[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(2): 182-190.
- [12] JIA H X, WANG X, XIAO J J, et al. Simulated soil organic carbon stocks in northern China's cropland under different climate change scenarios[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105088.
- [13] OUYANG W, SHAN Y, HAO F, et al. Differences in soil organic carbon dynamics in paddy fields and drylands in northeast China using the CENTURY model[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 194: 38-47.
- [14] GILHESPY S L, ANTHONY S, CARDENAS L, et al. First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 292: 51-62.
- [15] LI H, QIU J, WANG L, et al. Advance in a terrestrial biogeochemical model—DNDC model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 91-96.
- [16] GILTRAP D L, LI C, SAGGAR S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 136(3/4): 292-300.
- [17] LEMBAID I, MOUSSADEK R, MRABET R, et al. Modeling the effects of farming management practices on soil organic carbon stock under two tillage practices in a semi-arid region, Morocco[J]. *Heliyon*, 2021, 7(1):1-18.
- [18] 张琳, 邵景安. 未来 30 年川东平行岭谷区县域农田 SOC 动态模拟[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1848-1857.
ZHANG Lin, SHAO Jing'an. Dynamic simulation of farmland SOC in parallel ridge valley area in eastern Sichuan in the next 30 years[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(12): 1848-1857. (in Chinese with English abstract)
- [19] ZHANG L, ZHUANG Q, LI X, et al. Carbon sequestration in the uplands of Eastern China: An analysis with high-resolution model simulations[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 158: 165-176.
- [20] 倪元龙, 于东升, 张黎明, 等. 不同比例尺农田土壤碳库模拟的最佳栅格单元分辨率[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 32-40.
NI Yuanlong, Yu Dongsheng, Zhang Liming, et al. Optimal resolution of grid units of simulated paddysoil organic carbon pools of various scales[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 32-40. (in Chinese with English abstract)
- [21] JIA H X, WANG X, XIAO J J, et al. Simulated soil organic carbon stocks in northern China's cropland under different climate change scenarios[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213:9-15.
- [22] ZHANG J, HU K, LI K, et al. Simulating the effects of long-term discontinuous and continuous fertilization with straw return on crop yields and soil organic carbon dynamics using the DNDC model[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 302-314.
- [23] OU Y, ROUSSEAU A N, WANG L, et al. Spatio-temporal patterns of soil organic carbon and pH in relation to environmental factors—A case study of the Black Soil Region of Northeastern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 245: 22-31.
- [24] 梁尧, 蔡红光, 杨丽, 等. 玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(1): 133-140.
LIANG Yao, Cai Hongguang, Yang Li, et al. Effects of maize stovers returning by mulching or deep tillage on soil organic carbon sequestration in Mollisol[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(1): 133-140. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘之榆, 刘忠, 万炜, 等. SAR 与光学遥感影像的玉米秸秆覆盖度估算[J]. *遥感学报*, 2021, 25(6): 1308-1323.
LIU Zhiyu, LIU Zhong, WAN Wei, et al. Estimation of maize residue cover on the basis of SAR and optical remote sensing image[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(6): 1308-1323. (in Chinese with English abstract)
- [26] GAO L, ZHANG C, YUN W, et al. Mapping crop residue cover using Adjust Normalized Difference Residue Index based on Sentinel-2 MSI data[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220:105374.
- [27] ZHU M, FENG Q, QIN Y, et al. The role of topography in shaping the spatial patterns of soil organic carbon[J]. *Catena*, 2019, 176: 296-305.
- [28] 万炜, 李含微, 王佳莹, 等. 基于空间平滑法的旱作区粮食产量时空变化与影响因素研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(16): 284-296.
WAN Wei, LI Hanwei, WANG Jiaying, et al. Spatio-temporal changes and influencing factors of grain yield based on spatial smoothing method in dryland farming regions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(16): 284-296. (in Chinese with English abstract)
- [29] LIU S, JIN X, BAI Y, et al. UAV multispectral images for accurate estimation of the maize LAI considering the effect of soil background[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 121: 103383.
- [30] 王红彦, 王飞, 孙仁华, 等. 国外农作物秸秆利用政策法规综述及其经验启示[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 216-222.
WANG Hongyan, WANG Fei, SUN Renhua, et al. Policies and regulations of crop straw utilization of foreign countries and its experience and inspiration for China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions*

- of the CSAE), 2016, 32(16): 216-222. (in Chinese with English abstract)
- [31] 农业农村部: 鼓励以秸秆为原料生产非木浆纸等产品 [J]. 中华纸业, 2022, 43(9): 1.
- [32] WAN W, LIU Z, LI B, et al. Evaluating soil erosion by introducing crop residue cover and anthropogenic disturbance intensity into cropland C-factor calculation: Novel estimations from a cropland-dominant region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 219: 105343.
- [33] YUE J, TIAN Q, DONG X, et al. Using broadband crop residue angle index to estimate the fractional cover of vegetation, crop residue, and bare soil in cropland systems[J]. *Remote sensing of environment*, 2020, 237: 111538.
- [34] ZHAO X, VIRK A L, MA S-T, et al. Dynamics in soil organic carbon of wheat-maize dominant cropping system in the North China Plain under tillage and residue management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 265:1-10.
- [35] TANG H, QIU J, WANG L, et al. Modeling soil organic carbon storage and its dynamics in croplands of China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(5): 704-712.
- [36] XI X, YANG Z, CUI Y, et al. A study of soil organic carbon distribution and storage in the Northeast Plain of China[J]. *Geoscience frontiers*, 2011, 2: 115-123.
- [37] WANG S, ZHANG X, ADHIKARI K, et al. Predicting soil organic carbon stocks under future land use and climate change conditions in Northeast China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 103: 107278.
- [38] DING W, CHANG N, ZHANG G, et al. Soil organic carbon changes in China's croplands: A newly estimation based on DNDC model[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 905: 167107.
- [39] 裴浩, 苗宇, 侯瑞星. 全球黑土区有机物料还田对土壤有机碳固存影响的 Meta 分析 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 79-88.
- PEI Hao, MIAO Yu, HOU Ruixing. Meta analysis of the effects of global organic material returning on soil organic carbon sequestration in Mollisols[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(16): 79-88. (in Chinese with English abstract)
- [40] 焉莉, 王寅, 冯国忠, 等. 吉林省农田土壤肥力现状及变化特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4800-4810.
- YAN Li, WANG Yin, FENG Guozhong, et al. Status and change characteristics of farmland soil fertility in Jilin Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4800-4810. (in Chinese with English abstract)
- [41] DOU X, HE P, CHENG X, et al. Long-term fertilization alters chemically-separated soil organic carbon pools: Based on stable C isotope analyses[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 19061.
- [42] 全国农业可持续发展规划 (2015-2030 年) [J]. 农村实用技术, 2016(4): 5-15.
- [43] 石艳香, 迟凤琴, 张久明, 等. 不同施肥处理黑土中添加秸秆对土壤团聚体稳定性及有机碳贡献率的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 856-863.
- SHI Yanxiang, CHI Fengqin, ZHANG Jiuming, et al. Effects of straw addition on stability of soil aggregates and contribution of organic carbon under different fertilization treatments in black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(4): 856-863. (in Chinese with English abstract)
- [44] 徐英德, 裴久渤, 李双异, 等. 东北黑土地不同类型区主要特征及保护利用对策[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 495-504.
- XU Yingde, PEI Jiubo, LI Shuangyi, et al. Main characteristics and utilization countermeasures for black soils in different regions of northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(2): 495-504. (in Chinese with English abstract)
- [45] CHEN X, WU J, OPOKU-KWANOWAA Y. Effects of organic wastes on soil organic carbon and surface charge properties in primary saline-alkali soil[J]. *Sustainability* 2019, 11: 7088.
- [46] 李昌明, 王晓玥, 孙波. 不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1206-1217.
- LI Changming, WANG Xiaoyue, SUN Bo. Characteristics of nutrient release and its affecting factors during plant residue decomposition under different climate and soil conditions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1206-1217. (in Chinese with English abstract)
- [47] ZHENG H, LIU W, ZHENG J, et al. Effect of long-term tillage on soil aggregates and aggregate-associated carbon in black soil of Northeast China[J]. *PLoS One*, 2018, 13(6): e0199523.
- [48] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1381-1392.
- ZHANG Yeye, MO Fei, HAN Juan, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1381-1392. (in Chinese with English abstract)
- [49] YANG J, QIN R, SHI X, et al. The effects of plastic film mulching and straw mulching on licorice root yield and soil organic carbon content in a dryland farming[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826.
- [50] HAO X, HAN X, WANG C, et al. Temporal dynamics of density separated soil organic carbon pools as revealed by $\delta^{13}\text{C}$ changes under 17 years of straw return[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 356: 108656.
- [51] WANG Y, WU P, MEI F, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112391.
- [52] ZHU L, HU N, ZHANG Z, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different

- annual straw return rates in a rice–wheat cropping system[J]. *Catena*, 2015, 135: 283-289.
- [53] LI S, LI Y, LI X, et al. Effect of straw management on carbon sequestration and grain production in a maize–wheat cropping system in Anthrosol of the Guanzhong Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 157: 43-51.
- [54] ZOU H, YE X, LI J, et al. Effects of straw return in deep soils with urea addition on the soil organic carbon fractions in a semi-arid temperate cornfield[J]. *PLOS ONE*, 2016, 11(4): e0153214.
- [55] SILVA A G B, LISBOA I P, CHERUBIN M R, et al. How much sugarcane straw is needed for covering the Soil?[J]. *BioEnergy Research*, 2019, 12(4): 858-864.

Soil organic carbon simulation under conservation tillage using DNDC model coupled with remote sensing technology

LIU Hongjun^{1,2}, XU Zhaohui^{1,2}, ZHOU Yongxin^{1,2}, SUN Junling^{1,2}, WAN Wei³, LIU Zhong^{1,2✉}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China; 3. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resources Utilization, Ministry of Education, School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Farming practices can contribute to the soil organic carbon storage in the carbon budget of farmland ecosystems. This study aims to determine the dynamic response pattern of conservation tillage to the soil organic carbon. The density of soil organic carbon under conservation tillage was collected from the cornfield in Jilin Province, China from 2000 to 2020 at the county and grid scales. The "golden corn belt" in Jilin Province was taken as the study area, and the spring corn was selected as the research object. Remote sensing inversion was used to couple the Denitrification-Decomposition (DNDC) model. Firstly, the crop residue coverage was inverted using remote sensing. The input parameter of the model was selected to optimize the residue management module in the DNDC model. Secondly, the local soil properties were combined with the meteorology and farmland measure data. Regional simulation was implemented using two division units, in order to accurately depict the spatiotemporal dynamic evolution of soil organic carbon density under conservation tillage. In addition, the potential of conservation tillage was further explored to increase the soil carbon pools. The simulation was finally performed on the growth potential of soil organic carbon density under different straw return scenarios, according to the parameters of crop residue coverage in the DNDC model. The results show: 1) The DNDC model was feasible in this case. The R^2 value reached 90% for the soil organic carbon under different farmland measures, and the relative root mean square error values were all within 10%. The relatively better performance was used to simulate the local soil organic carbon density and long-term forecasts. 2) Soil organic carbon storage in cornfields increased significantly over the past 20 years, from 6.08×10^8 to 1.22×10^9 t. The reason was closely related to the expansion of the cultivated land area. The soil organic carbon density varied between 4.46 and 98.09 t/hm² at the county scale, while there was a variation between 3.34 and 139.2 t/hm² at the grid scale. The overall density of soil organic carbon showed a spatial distribution pattern of high in the central region and low in the northern region. 3) Conservation tillage posed a more significant impact on the organic carbon accumulation in the surface soil. The highest growth rate of soil organic carbon density in the 0-10 cm soil layer was 4.4%, while only 0.09% was found in the 10-20 cm soil layer. 4) The huge growth potential of soil organic carbon was observed in the southwestern and central regions in the growth range from 0.24 to 0.57 t/hm², particularly with the increase of crop residue coverage. 5) The fineness of the unit division dominated the simulation. There were slightly different values of the simulation under different units. But there was no spatial distribution of the research subjects. Compared with the spatial distribution after simulation at the county level, the grid scale was indicated in much more detail. In summary, the conservation tillage significantly increased the soil organic carbon in cornfields. The farmland ecosystem shared great potential for carbon sequestration in the future. However, there are local differences in the response of soil organic carbon to the conservation tillage. Therefore, the finding can provide an important reference for the decision-making on conservation tillage tunable for local conditions and carbon budget in farmland ecosystems.

Keywords: straw; remote sensing; carbon; DNDC model; scenario simulation; organic carbon density; Jilin Province