

马子钰, 马文林, 贾小红, 等. 基于DNDC模型的玉米田土壤有机碳变化模拟预测[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(4): 192-198.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.04.022

# 基于DNDC模型的玉米田土壤有机碳变化模拟预测

马子钰<sup>1</sup>, 马文林<sup>1</sup>, 贾小红<sup>2</sup>, 王胜涛<sup>2</sup>, 张蕾<sup>2</sup>

1. 北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京 102616; 2. 北京耕地建设保护中心, 北京 100101

**摘要** 为揭示有机碳变化的关键影响因素并为北京地区实现固碳减排目标提供科学依据, 利用北京怀柔区前桥梓村玉米田2016—2019年土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)实测数据对反硝化-分解模型(denitrification-decomposition model, DNDC)进行验证, 选取气候、土壤及秸秆还田等主要影响因子对验证后的DNDC模型进行敏感性分析, 模拟了2种典型浓度路径(RCP8.5、RCP4.5)下该农田未来(至2100年)土壤有机碳变化情况。结果显示: 经过校验后的DNDC模型可较好地模拟该玉米田SOC变化; 初始有机碳含量及秸秆还田率是SOC变化的主要影响因素; RCP8.5及RCP4.5下SOC含量增加明显, 土壤碳库在2100年达到平衡, 2100年有机碳含量分别达到27.70、29.03 g/kg, 分别较初始有机碳含量上升197.85%和212.15%。结果表明, DNDC模型可用于该研究区玉米田有机碳变化预测, 该农田持续采用当前施肥和秸秆还田管理方式可实现土壤持续固碳。

**关键词** DNDC模型; 土壤有机碳; 敏感性分析; 模拟预测; 玉米田; 农田土壤碳汇; 碳中和  
**中图分类号** O242.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)04-0192-07

土壤是陆地生态系统的最大碳库, 其碳库含量约是大气碳库的3倍, 土壤碳库含量的微小变化将导致大气CO<sub>2</sub>浓度的明显波动<sup>[1]</sup>, 而提升土壤碳库则可有效减缓全球温室气体含量升高趋势。农田土壤碳库约占陆地土壤总碳库的8%~10%<sup>[2]</sup>, 模拟预测农田土壤有机质变化对于改良土壤管理措施、促进其碳库增加具有重要作用。然而, 在土壤固碳量的评估方法选择上, 传统的田间试验需要消耗大量人力物力, 同时易受不可控因素影响<sup>[3]</sup>; 利用模型法研究土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量动态变化则是一种高效的方式<sup>[4]</sup>。

反硝化-分解模型(denitrification-decomposition model, DNDC)起源于美国, 由2个部分共6个模块构成<sup>[5]</sup>, 用于土壤温室气体排放模拟和预测<sup>[6]</sup>, 随着模型的不断发展和完善, 已在2000年被全球气候变化模型国际学术会议认定为亚太地区首选的地球生化模型<sup>[7]</sup>, 并在模拟研究我国农田SOC含量变化的领域中得到应用。例如, Liao等<sup>[8]</sup>通过DNDC模型对2012—2031年山东省桓台县的SOC含量进行模拟后发现, 粪肥(N)还田量在40 kg/hm<sup>2</sup>时SOC含量

将达到最高水平, 为当地建设农田“碳汇”方案提供参考; Zhang等<sup>[9]</sup>利用DNDC模型研究未来不同气候情境下垄沟全膜覆盖系统对旱地SOC含量的影响, 研究结果表明2060年前持续采用垄沟全膜覆盖系统SOC含量增加, 为当地旱田土壤更好发挥固碳作用奠定了科学基础。

2021年, 北京地区玉米播种面积已达到4.3万hm<sup>2</sup>, 占全市农作物播种总面积的35.24%, 玉米成为北京地区最主要种植的粮食作物<sup>[10]</sup>。研究玉米田管理措施对SOC含量的影响, 对实现全市农业“碳中和”目标具有重要意义。因此, 本研究利用北京市怀柔区玉米田定点试验的有机碳观测值校正DNDC模型, 探究影响SOC含量变化的关键因素, 结合未来气象预估数据, 预测未来气候情境下的SOC变化趋势, 旨在为我国开发农业碳汇提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区基本情况

研究区属北京市农田长期定点监测地块, 位于

收稿日期: 2023-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0211703); 现代农业产业技术体系北京市生态循环与低碳发展创新团队(BAIC08-2023-SYZ04); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项(X19009)

马子钰, E-mail: mzyBUCEA@126.com

通信作者: 马文林, E-mail: mawenlin1130@126.com

北京市怀柔区桥梓镇前桥梓村(116.57°E, 40.28°N), 属于半湿润大陆性季风气候, 冬季寒冷少雪, 夏季暖热湿润, 年均降雨量约 600~700 mm, 海拔 67.7 m, 无霜期 205 d。

研究区农田为农户所有, 种植模式为春玉米连作, 无重复。农田初始土壤理化性质为有机质 15.97 g/kg、容重 1.41 g/cm<sup>3</sup>、pH 8.0、全氮 0.86 mg/kg、有效磷 33.7 mg/kg 和速效钾 117 mg/kg, 质地为壤土。2016—2020 年, 该农田种植春玉米, 2016 年施尿素 348 kg/hm<sup>2</sup>, 2017 年施尿素 208.8 kg/hm<sup>2</sup>、复合肥 (12-18-15) 180 kg/hm<sup>2</sup>, 2018 年施复合肥 (12-10-20) 171.4 kg/hm<sup>2</sup>, 2019 年施复合肥 (26-10-12) 487.5 kg/hm<sup>2</sup>, 各年秸秆全量还田。玉米田仅 2016 年进行过灌溉, 灌溉水量为 12 cm, 其余年份均雨养。根据气温和降雨量情况, 每年于 4 月 27 日—6 月 2 日播种, 并于 8 月 3 日—9 月 23 日收获, 机播机收, 不喷洒农药。

## 1.2 参数来源

本研究应用 DNDC9.5 版本, 模型需要输入的参数主要包括气象数据、土壤数据以及农田管理数据, 数据来源如下:

1) 气象数据。研究区 2016—2019 年的气象数据, 包括日平均气温和日降水量等数据, 来源于 RP5 国际交换气象站 (<http://rp5.ru>), 其实际气象数据来源于各地气象站, 具有较高的数据可靠性<sup>[11]</sup>, 降水中氮浓度、大气中氨浓度和 CO<sub>2</sub> 浓度及年 CO<sub>2</sub> 增速等参数分别参考 Liu 等<sup>[12]</sup>、孙庆瑞等<sup>[13]</sup>和王长科等<sup>[14]</sup>。

此外, 依据 IPCC 第 5 次评估报告中提出的 4 种典型浓度路径<sup>[15]</sup>, 本研究选取较为保守的无气候变化政策措施干预下的高排放 RCP8.5 浓度路径和采取气候变化政策措施干预下的低排放 RCP4.5 浓度路径<sup>[16-17]</sup>, 模拟预测 SOC 含量对未来气候变化下的响应。未来气象预估数据来源于北京市发展和改革委员会设立的“2015 年适应气候变化极端风险预警平台前期开发研究”科技项目 (ZB-15-85) 的科研成果。

2) 土壤数据。农田初始 SOC、全氮、速效磷和速效钾含量为研究区农田 0~20 cm 土壤耕层实测值, 其中, SOC 测定方法为重铬酸钾-外加热法 (NY/T 1121.6—2006), 全氮测定方法为凯氏法 (HJ 717—2014), 速效磷测定方法为 Olsen-P 法 (HJ 704—2014), 速效钾测定方法为乙酸铵提取-火焰光度法 (NY/T 889—2004); 土壤质地通过现场实际调查获

得; 土壤 pH 和容重信息来源于世界土壤数据库。

3) 田间管理数据。研究区的农田管理数据 (包括农作物种类、种植及收获日期、肥料种类、施肥量、灌溉量及秸秆还田量等) 来源于北京市农田长期定位监测数据库中的实际调查监测数据。

## 1.3 模型验证

降低 DNDC 模型模拟结果的不确定度是应用模型的重要前提<sup>[18]</sup>。本研究主要采用相对均方根误差  $X_{RMSE}$ 、归一化均方根误差  $X_{N-RMSE}$  及一致化指标  $d$ <sup>[19]</sup> 等参数对模型模拟结果进行验证。上述模型评价参数按照公式 (1)~(3) 计算:

$$X_{RMSE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \quad (1)$$

$$X_{N-RMSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - O_i|}{O_i} \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

式 (1)~(3) 中,  $O_i$ 、 $\bar{O}$  和  $M_i$  分别表示每年 SOC 观测值、观测值平均值及模拟值;  $n$  表示样本数。  $X_{RMSE}$ 、 $X_{N-RMSE}$  值越小、 $d$  值越接近 1 时, 表示模拟结果与实测值贴合度越好。其中, 当  $X_{RMSE}$  值 < 20% 时, 说明模拟值与实测值贴合度优良<sup>[18]</sup>;  $X_{N-RMSE}$  值 < 25% 时, 说明模拟值与实测值一致性最佳, 介于 25%~30% 时, 模拟结果可以接受, 但超过 30% 时, 则贴合度差<sup>[19]</sup>;  $d$  值范围为  $0 \leq d \leq 1$ , 越趋近于 1 表示模拟效果越好, 当  $d \geq 0.7$  时, 模拟结果可以被接受<sup>[20]</sup>。

## 1.4 敏感性分析

以研究区的气象条件、土壤特征和农田管理方式为基准情境进行 DNDC 模型的敏感性分析, 通过调整参数, 分析 SOC 固定对不同输入参数的敏感性。本研究采用独立参数扰动法<sup>[21]</sup>, 即假设各参数相互独立, 在一定变化范围内调整测试参数, 利用敏感性指数计算测试参数的敏感性, 计算方法见公式 (4):

$$S = \frac{(O_2 - O_1) / \bar{O}}{(I_2 - I_1) / \bar{I}} \quad (4)$$

式 (4) 中,  $I_1$ 、 $I_2$  分别为输入参数中的最小值和最大值,  $\bar{I}$  为输入参数  $I_1$ 、 $I_2$  的平均值,  $O_1$ 、 $O_2$  分别为  $I_1$ 、 $I_2$  对应的模拟结果,  $\bar{O}$  为  $O_1$ 、 $O_2$  的平均值。

本研究中各因子的基准值及变更情况如表 1 所示。

表1 模型敏感性分析基准值及更改值

Table 1 The base and change values of parameters to sensitivity analysis

参数 Parameters	基准值 Base values	更改值 Change values
年均温度/°C Mean annual temperature	13.89	11.11、16.68
年均降雨量/mm Mean annual precipitation	596	476.8、715.2
降雨氮质量浓度/(mg/L) N concentration in precipitation	3.5	2.8、4.2
大气CO <sub>2</sub> 质量浓度/(g/m <sup>3</sup> ) CO <sub>2</sub> concentration in atmosphere	400.375	320.29、480.44
黏粒含量/% Clay content	19	15、23
初始有机碳含量/(g/kg) Initial SOC content	9.3	7.44、11.16
酸碱度 pH	8.0	6.4、9.6
秸秆还田率/% Straw returning rate	100	25、75
化肥用量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Chemical fertilizer amount	348.93	418.72、279.14

### 1.5 预测方法

由于土壤有机质转换周期较长<sup>[22]</sup>,本研究选取IPCC第5次评估报告中提出的较为保守的无气候变化政策措施干预下的高排放RCP8.5浓度路径<sup>[16-17]</sup>和采取气候变化政策措施干预下的RCP4.5浓度路径,利用DNDC模型模拟未来(至2100年)SOC含量在上述2种典型浓度路径下,按照当地施肥措施进行管理的变化情况。当土壤碳库达到平衡时,采用式(5)计算最大年均土壤固碳潜力( $P_{MSOC}$ )。

$$P_{MSOC} = \frac{C_{SOC2} - C_{SOC1}}{n} \quad (5)$$

表2 主要影响因子对SOC含量的敏感性分析

Table 2 The results of sensitivity analysis

测试参数 Testing parameters	参数变化范围 Range of parameters	年均土壤固碳速率/(g/(kg·a)) Annual SOC sequestration rate	敏感性指数 Sensitivity index
氮肥用量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Chemical fertilizer amount	279.14~418.72	0.60~0.54	-0.26
秸秆还田率/% Straw returning rate	25~75	0.10~0.39	1.18
年均温度/°C Mean annual temperature	11.11~16.68	0.61~0.55	-0.25
年均降雨量/mm Mean annual precipitation	476.8~715.2	0.56~0.58	0.10
降雨氮质量浓度/(mg/L) N concentration in precipitation	2.8~4.2	0.56~0.56	无影响/No effect
大气CO <sub>2</sub> 质量浓度/(g/m <sup>3</sup> ) CO <sub>2</sub> concentration in atmosphere	320.29~480.44	0.54	0.14
黏粒含量/% Clay content	15~23	0.58~0.55	-0.63
初始有机碳含量/(g/kg) Initial SOC content	7.44~11.16	0.17~0.96	3.51
pH	6.4~9.6	0.55~0.58	0.14

式中, $C_{SOC2}$ 为试验末期有机碳含量,g/kg; $C_{SOC1}$ 为试验初期有机碳含量,g/kg; $n$ 为试验年限,a。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证

通过试错法不断对模型参数予以校正,验证结果如图1所示。由图1可知,模型模拟值与观测值尽管存在一定偏差,但处理的 $X_{RMSE}$ 、 $X_{N-RMSE}$ 均 $\leq 15\%$ ,且一致性指标 $d=0.70$ (图1),这些指标值均在优良范围内,表明DNDC模型可以较好地模拟研究区土壤有机质含量的长期变化趋势。

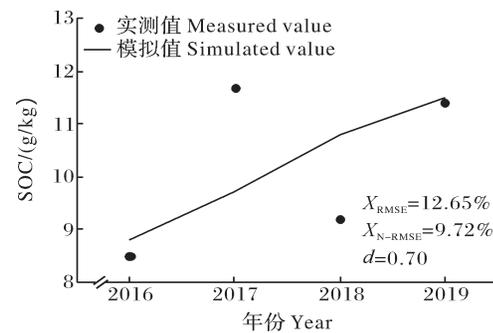


图1 SOC含量模拟值与观测值对比

Fig.1 The comparison of simulated and measured value of SOC

### 2.2 SOC变化的敏感性分析

对SOC变化的主要影响因子进行敏感性分析,结果(表2)显示,不同气候、土壤初始性质及农田管理措施对土壤有机质含量呈现出不一致的敏感性变化。各项参数中,对SOC含量影响敏感性最高的2个参数为初始有机碳含量和秸秆还田率,其余参数影响程度均较小。

### 2.3 模拟预测

1) 怀柔未来气象变化。2016—2100年怀柔地区

气温和降水量变化趋势如图2所示。由图2可知,2种浓度路径下气温均随时间增加而呈现出上升的趋势,但RCP8.5浓度路径下降水量将随时间增加而逐渐增加,而RCP4.5浓度路径下降水量将随时间增加

而逐渐下降。对不同典型浓度路径下气候变化特点进行深入分析得出,RCP8.5和RCP4.5浓度路径下年均温度分别为12.44℃和11.15℃,年均降水量分别为773.47 mm和774.98 mm。

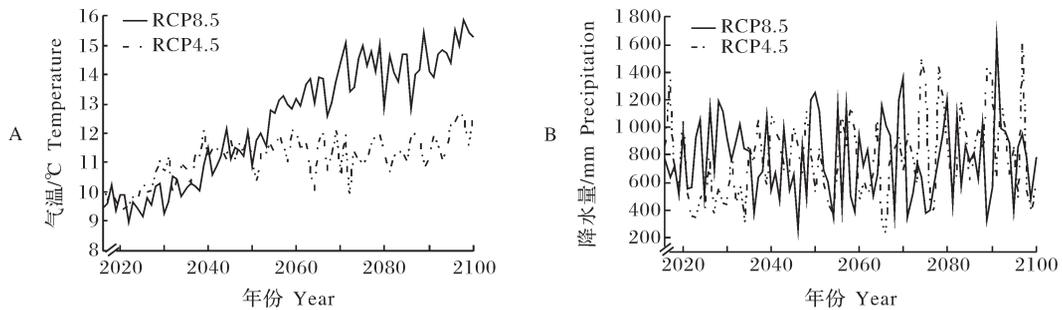


图2 2016—2100年典型浓度路径RCP4.5和RCP8.5情境下气温(A)和降水量(B)变化

Fig.2 Changes of temperature(A) and precipitation(B) under typical concentration pathways RCP4.5 and RCP8.5 during 2016 and 2100

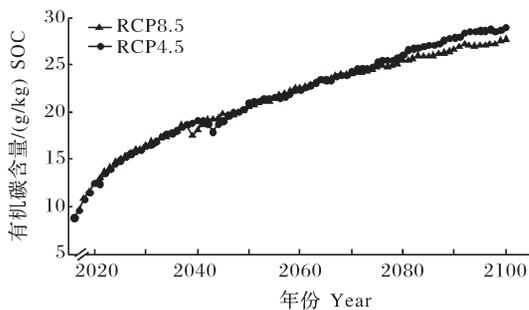


图3 不同典型浓度路径下农田SOC含量变化模拟预测结果

Fig.3 Simulation and prediction results of farmland SOC under different RCPs

2)未来有机碳变化。利用DNDC模型对不同典型浓度路径下研究区SOC含量变化进行模拟预测,结果如图3所示。由图3可见,在2种典型浓度路径下,农田SOC含量均随时间增加而增加,但增速渐缓。同时,RCP4.5和RCP8.5浓度路径下SOC含量的增幅也不同,评估末年(2100年)SOC含量分别为29.03 g/kg和27.7 g/kg,较初始有机碳含量分别增加212.15%和197.85%。究其原因,RCP4.5路径比RCP8.5增温程度低(图2),而低温条件有利于SOC含量的积累<sup>[1,23]</sup>,因此,RCP4.5浓度路径下评估末期农田SOC含量较高。

根据图3数据,计算得出当农田管理措施持续实施77 a(至2100年)时,RCP4.5路径比RCP8.5具有较高的土壤固碳潜力,分别为0.25 g/(kg·a)和0.23 g/(kg·a)。

### 3 讨论

#### 3.1 模型验证与敏感性分析

关于DNDC模型对我国不同生态气候区的适用情况,已有多位学者进行了研究,认为DNDC模型可以较好地实现对我国农田SOC含量变化的模拟预测<sup>[24]</sup>。金琳等<sup>[25]</sup>对我国5个具有代表性的试验站点的有机碳变化情况进行模拟,得出模型预测值基本可以反映有机碳含量变化的实际情况,而Wang等<sup>[26]</sup>和张凡等<sup>[27]</sup>分别运用DNDC模型模拟河北省和山西省农田SOC变化,表明DNDC模型也可用于模拟我国北方地区农田SOC变化情况。本研究结果中模型模拟值与观测值具有较高的一致性。因此,应用DNDC模型模拟怀柔区玉米田SOC变化趋势是可行的。

本研究还得出,初始有机碳含量及秸秆还田率是影响该玉米田有机碳变化的主要影响因素。张钊等<sup>[28]</sup>、吕宏菲<sup>[29]</sup>的研究也发现土壤初始有机碳是影响土壤有机碳含量变化的最主要因素。然而,吕宏菲<sup>[29]</sup>通过DNDC模型对陕西省麦玉轮作系统模拟的敏感性分析得出,增加秸秆还田率会导致土壤有机碳含量对初始表土有机碳含量敏感程度不断降低,这可能是由于秸秆还田可以通过直接补充有机质和改善土壤环境的方式促进土壤固碳,也间接表明秸秆还田率是影响土壤有机碳含量变化的重要因素。

#### 3.2 预测分析

未来不同典型浓度路径下气候条件随时间的变化呈现出不同的变化趋势(图2)。对2种不同典型浓

度路径下的气候特点进行对比分析,发现RCP8.5浓度路径下气候波动更剧烈,与朱明亚等<sup>[30]</sup>、Xu等<sup>[31]</sup>预测结果基本一致。

本研究得出,RCP4.5路径比RCP8.5具有较高的土壤固碳潜力,分别为0.25 g/(kg·a)和0.23 g/(kg·a)。然而,贺美等<sup>[18]</sup>在吉林省玉米田进行的秸秆配施化肥处理对SOC含量变化监测结果表明,土壤碳库在第16年时达到平衡,计算得到土壤固碳潜力为0.38 g/(kg·a),高于本研究结果,说明未来若继续在本研究区块采取当前管理措施,土壤固碳潜力较低。然而,也有研究表明,秸秆还田50 a条件下土壤碳库可以达到稳定<sup>[32-33]</sup>,低于本研究的模拟结果。

值得注意的是,RCP4.5和RCP8.5浓度路径下分别第28年和第24年时出现有机碳含量的小幅下降(图3),分析认为,RCP4.5和RCP8.5浓度路径下的降雨量分别第28年和第24年前后出现了突然减小的情况,从而导致有机碳含量出现下降。宋佳珊等<sup>[17]</sup>利用DNDC模型模拟麦玉轮作条件下的SOC含量变化,当第10年降水量减小时,也伴随出现了SOC含量下降的现象,与本研究结果一致。因此,气候波动对农田SOC含量有不可忽略的影响,遇到低降水年应及时向土壤中补充优质有机碳,从而降低SOC库损失。

本研究首先对模型参数进行了校正,以提高模型模拟结果的可靠性。研究结果表明该模型可以较好地模拟农田SOC含量变化。通过进一步开展敏感性分析得出,SOC变化对初始有机碳含量及秸秆还田率等参数较为敏感。DNDC模型模拟结果表明,研究区采用当前的施肥管理措施,在RCP4.5和RCP8.5这2种典型浓度路径下,农田SOC含量变化均随时间推进而呈现出增加的趋势,但有机碳含量增速逐渐下降,第77年时土壤碳库达到平衡。同时,未来降水波动可能会导致农田SOC含量损失,需关注降水对农田土壤固碳管理措施的影响。综上,在农业生产实际过程中,实施秸秆还田、因地制宜地制定农田土壤管理措施,可促进农田土壤碳库增加。

## 参考文献 References

- [1] 马子钰,马文林.施肥对中国农田土壤固碳影响效应研究[J].土壤,2022,54(5):905-911. MA Z Z, MA W L. Effects of fertilization on soil organic carbon in cropland of China [J]. Soils, 2022, 54(5):905-911 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李昊昱,孟兆良,庞党伟,等.周年秸秆还田对农田土壤固碳及冬小麦-夏玉米产量的影响[J].作物学报,2019,45(6):893-903. LI H Y, MENG Z L, PANG D W, et al. Effects of annual straw return model on soil carbon sequestration and crop yields in winter wheat-summer maize rotation farmland [J]. Acta agronomica sinica, 2019, 45(6):893-903 (in Chinese with English abstract).
- [3] 薛静,李旭强,陈军锋,等.不同降水年型下春玉米适宜秋浇模式的模拟研究[J].灌溉排水学报,2021,40(6):80-87. XUE J, LI X Q, CHEN J F, et al. Suitable irrigation scheduling for spring maize under different annual precipitation patterns in Hetao Irrigation District [J]. Journal of irrigation and drainage, 2021, 40(6):80-87 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张凤,王世航,王军委.土壤有机碳模型研究进展[J].宜春学院学报,2019,41(9):12-18. ZHANG F, WANG S H, WANG J W. Research progress of soil organic carbon model [J]. Journal of Yichun University, 2019, 41(9):12-18 (in Chinese with English abstract).
- [5] 王多斌,籍常婷,林慧龙.基于DNDC模型的高寒草甸土壤有机碳含量动态研究[J].草业学报,2019,28(12):197-204. WANG D B, JI C T, LIN H L. A 'denitrification-decomposition' (DNDC) model evaluation of alpine meadow soil carbon response to climate change [J]. Acta praeiculturae sinica, 2019, 28(12):197-204 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张守都,栗岩峰,李久生.基于DNDC模型的东北半湿润区膜下滴灌玉米施肥制度优化[J].中国水利水电科学研究院学报,2018,16(2):113-121. ZHANG S D, LI Y F, LI J S. Optimization of fertilizing schedule for maize with mulched drip irrigation in sub-humid region of Northeast China DNDC model [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(2):113-121 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李强,李建国,张忠启,等.基于DNDC模型与二分法的滨海盐渍土水稻最佳施氮量研究[J].水土保持通报,2018,38(3):167-173. LI Q, LI J G, ZHANG Z Q, et al. Optimizing N-fertilizer inputs for rice production in coastal saline based on a biogeochemical model and dichotomy [J]. Bulletin of soil and water conservation, 2018, 38(3):167-173 (in Chinese with English abstract).
- [8] LIAO Y, WU W L, MENG F Q, et al. Impact of agricultural intensification on soil organic carbon: a study using DNDC in Huantai County, Shandong Province, China [J]. Journal of integrative agriculture, 2016, 15(6):1364-1375.
- [9] ZHANG F, ZHANG W, LI M, et al. Is crop biomass and soil carbon storage sustainable with long-term application of full plastic film mulching under future climate change? [J]. Agricultural systems, 2017, 150:67-77.
- [10] 北京市统计局.北京统计年鉴2022[M].北京:中国统计出版社,2022. Beijing Municipal Statistics Bureau. Beijing statistical yearbook 2022 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022 (in Chinese).

- [11] 唐豪. 基于高斯模型的在航船舶尾气扩散研究[D]. 南京: 东南大学, 2021. TANG H. Research on exhaust gas diffusion of ships at sea based on gaussian model[D]. Nanjing: Southeast University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [12] LIU X, JU X, ZHANG Y, et al. Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijing area[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2006, 113(1-4): 370-377 (in Chinese with English abstract).
- [13] 孙庆瑞, 王美蓉. 我国氨的排放量和时空分布[J]. *大气科学*, 1997, 21(5): 79-87. SUN Q R, WANG M R. Ammonia emission and concentration in the atmosphere over China[J]. *Scientia atmospherica sinica*, 1997, 21(5): 79-87 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王长科, 王跃思, 刘广仁. 北京城市大气CO<sub>2</sub>浓度变化特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2003, (4): 13-17. WANG C K, WANG Y S, LIU G R. Characteristics of atmospheric CO<sub>2</sub> variations and some affecting factors in urban area of Beijing[J]. *Environmental science*, 2003, (4): 13-17 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王向一. 我国双季稻区域温室气体排放模拟研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2019. WANG X Y. Simulation of GHG emissions in cropping paddy field[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [16] HWANG W, KIM C, CHO K, et al. Characteristics of greenhouse gas emissions from rice paddy fields in South Korea under climate change scenario RCP-8.5 using the DNDC model[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(2): 332-341.
- [17] 宋佳珊. 麦玉体系土壤有机碳和作物产量对长期施肥及气候变化的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. Response of soil organic carbon and crop yield to long-term fertilization and climate change in winter-wheat and summer-maize rotation [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [18] 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]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2017, 23(1): 9-19 (in Chinese with English abstract).
- [19] 乔帅帅, 胡振华, 魏征, 等. DNDC模型在华北平原冬小麦区的率定和验证[J]. *中国农村水利水电*, 2018, (6): 22-26. QIAO S S, HU Z H, WEI Z, et al. The calibration and validation of DNDC model in winter wheat regions of North China Plains[J]. *China rural water and hydropower*, 2018, (6): 22-26 (in Chinese with English abstract).
- [20] JIANG R, YANG J Y, DRURY C F, et al. Assessing the impacts of diversified crop rotation systems on yields and nitrous oxide emissions in Canada using the DNDC model[J/OL]. *Science of the total environment*, 2021, 759: 143433 [2023-01-06]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143433>.
- [21] 薛静, 毛萌, 任理. DNDC模型在曲周试验站的参数灵敏度分析及率定[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(13): 2695-2708. XUE J, MAO M, REN L. The parameter sensitivity analysis and calibration of DNDC model in Quzhou agricultural experiment station [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2013, 46(13): 2695-2708 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王德营, 姚艳敏, 司海青, 等. 黑土有机碳变化的DNDC模拟预测[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(3): 277-283. WANG D Y, YAO Y M, SI H Q, et al. Using DNDC model to simulate and predict changes in black soil organic carbon[J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2014, 22(3): 277-283 (in Chinese with English abstract).
- [23] 李晓茜, 邹俊亮, 武菊英, 等. 土壤呼吸和有机碳对增温的响应及其影响因素分析[J]. *地球与环境*, 2022, 50(4): 471-480. ZHANG X H, ZOU J L, WU J Y, et al. Responses of soil respiration and organic carbon to warming and their influencing factors [J]. *Earth and environment*, 2022, 50(4): 471-480 (in Chinese with English abstract).
- [24] 谢海宽, 江雨倩, 李虎, 等. DNDC模型在中国的改进及其应用进展[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2760-2770. XIE H K, JIANG Y Q, LI H, et al. Modification and application of the DNDC model in China[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2017, 28(8): 2760-2770 (in Chinese with English abstract).
- [25] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. DNDC模拟中国20年农田管理土壤碳变化[J]. *土壤通报*, 2010, 41(5): 1081-1085. JIN L, LI Y E, GAO Q Z, et al. Analysis of the change of soil carbon under cropland management in China between 1981 and 2000 by DNDC[J]. *Chinese Journal of soil science*, 2010, 41(5): 1081-1085 (in Chinese with English abstract).
- [26] WANG L, QIU J, TANG H, et al. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China[J]. *Geoderma*, 2008, 147(1/2): 47-55.
- [27] 张凡, 李长生, 王政. 耕作措施对陕西耕作土壤碳储量的影响模拟[J]. *第四纪研究*, 2006, (6): 1021-1028. ZHANG F, LI C S, WANG Z. Modeling the impacts of management alternatives on soil carbon storage of farmland in Shaanxi Province[J]. *Quaternary sciences*, 2006, (6): 1021-1028 (in Chinese with English abstract).
- [28] 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. Reasearch progress of biogeochemistry model DNDC in carbon dynamic modeling [J]. *Acta agrestia sinica*, 2017, 25(3): 445-452 (in Chinese with English abstract).
- [29] 吕宏菲. 基于DNDC模型对秸秆还田下土壤有机碳和作物产量的模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. LÜ H F. Simulation study on soil organic carbon and crop yield under straw returning based on DNDC model[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [30] 朱明亚, 潘毅群, 沙华晶, 等. 气候变化条件下中国典型城市未来天气参数与建筑能源需求预测[J]. *建筑节能*, 2013, 41(3): 57-64. ZHU M Y, PAN Y Q, SHA H J, et al. Prediction of fu-

- ture weather data and building energy demand for representative cities in China under climate change[J]. *Journal of building energy efficiency*, 2013, 41(3): 57-64 (in Chinese with English abstract).
- [31] XU C H, XU Y, et al. The pojection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble [J]. *Atmospheric & oceanic science letters*, 2012, 5(6): 527-533.
- [32] 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 N<sub>2</sub>O emissions from spring maize fields [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2014, 20(1): 75-86 (in Chinese with English abstract).
- [33] 颜学斌, 王俊, 王科锋, 等. 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[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(1): 42-49. YAN X B, WANG J, WANG K F, et al. Responses of soil organic carbon and crop yield to surface mulching with straw and plastic film in winter wheat field using DNDC model [J]. *Agricultural research in the arid areas*, 2022, 40(1): 42-49 (in Chinese with English abstract).

## Projection of soil organic carbon change of corn field based on DNDC

MA Ziyu<sup>1</sup>, MA Wenlin<sup>1</sup>, JIA Xiaohong<sup>2</sup>, WANG Shengtao<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>

1. *Beijing Climatic Change Response Research and Education Center, School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China;*  
 2. *Beijing Cultivated Land Construction and Protection Center, Beijing 100101, China*

**Abstract** By analyzing and predicting the changes in soil organic carbon content of maize fields in Qianqiaozi Village, Huairou District, we reveal the key influencing factors affecting organic carbon changes and provide a scientific basis for achieving carbon sequestration and emission reduction targets in Beijing, China. In this study, the DNDC model was validated using the actual measured organic carbon data from 2016 to 2019 in the maize fields, and then the main influencing factors such as climate, soil and material return were selected to conduct sensitivity analysis on the validated DNDC model, and finally the future (to 2100) organic carbon changes under different typical concentration pathways (RCP8.5, RCP4.5) were simulated. The results showed that: the calibrated DNDC model can simulate the soil organic carbon changes in this maize field well; the initial organic carbon content and straw return rate are the main influencing factors of organic carbon changes; the organic carbon content increases significantly under RCP8.5 and RCP4.5, and the soil carbon pool reaches equilibrium at about 77 years, and the organic carbon content reaches 27.70 g/kg and 29.03 g/kg by 2100, respectively. The DNDC model can be used to study organic carbon changes in maize fields in this study area, and this management approach can be used to sustain carbon sequestration in the future.

**Keywords** DNDC model; soil organic carbon; sensitivity analysis; simulation and projection; corn field; farmland soil carbon sink; carbon neutral

(责任编辑:张志钰)