

黑土有机碳变化的 DNDC 模拟预测*

王德营^{1,2} 姚艳敏^{1,2**} 司海青^{1,2} 唐鹏钦^{1,2}

(1. 农业部农业信息技术重点实验室 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081)

摘要 为探讨黑土有机碳的长期变化规律及 DNDC 模型在土壤有机碳预测方面的适用性, 本文利用吉林省公主岭地区黑土不同施肥措施下的长期定位试验数据, 选取不施肥(CK)、单施化肥(NPK)、配施有机肥(NPKM)和增施有机肥(M2+NPK)4个处理进行土壤有机碳分析, 并将数据用作 DNDC 模型验证。验证结果表明: 各处理 DNDC 验证中 *RMSE* 值均小于 10%(分别为 5.09%、6.11%、9.38%、8.36%), 说明模拟值与观测值一致性良好, 模型可用于该地区土壤有机碳模拟。选取了化肥施用、有机肥施用、秸秆还田比率、温度及降水 5 个因子进行模型的敏感性分析, 结果表明: 有机肥的施用对土壤有机碳含量的影响最显著, 且这种影响具有持久性。最后模拟了 4 种施肥情境下未来(至 2100 年)的土壤有机碳变化情况。结果表明: 对照不施肥处理(CK)土壤有机碳含量略有下降, 至 2100 年土壤有机碳含量为 11.55 g·kg⁻¹, 较试验前土壤初始有机碳(13.2 g·kg⁻¹)下降约 12.5%。单施化肥处理(NPK)土壤有机碳含量较为稳定, 并未出现土壤有机碳含量下降。配施有机肥(NPKM)和增施有机肥(M2+NPK)处理土壤有机碳含量增加明显, 至 2100 年土壤有机碳含量为 24.4 g·kg⁻¹和 27.6 g·kg⁻¹, 分别较初始有机碳含量上升 84.8%和 109.1%。

关键词 土壤有机碳 DNDC 模型 黑土 有机肥 公主岭

中图分类号: S2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2014)03-0277-07

Using DNDC model to simulate and predict changes in black soil organic carbon

WANG Deying^{1,2}, YAO Yanmin^{1,2}, SI Haiqing^{1,2}, TANG Pengqin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract The objectives of this paper were to study long-term patterns of change in black soil organic carbon (SOC) and the suitability of the DNDC model to predict SOC. Based on available data from pre-set long-term experiment in Gongzhuling, Jilin Province, 4 fertilization modes were used to analyze changes in SOC. The 4 fertilization modes included no fertilization (CK), only chemical fertilizer application (NPK), combining chemical and organic fertilizers application (NPKM) and chemical fertilizer with increased organic fertilizer application (M2+NPK). The data were also used to validate the DNDC model. The DNDC verification results showed that root mean square error (*RMSE*) of each treatment was less than 10%. This suggested that the simulated values were consistent with the observed values, and that the DNDC model was suitable for simulating SOC in the study area. Five factors (chemical fertilizer, organic manure, straw, temperature and precipitation) were used to test the sensitivity of the model. Organic manure application had the most significant and continuous effect on SOC content. Future SOC variation in the next 100 years was also predicted. The results showed that SOC content declined slightly (by 12.5%), from initial value of 13.2 g·kg⁻¹ to the predicted value of 11.55 g·kg⁻¹ in 2100 for the CK. For the NPK treatment, SOC content was stable and without any declining tendency. SOC contents of NPKM and M2+NPK treatments increased significantly to 24.4 g·kg⁻¹ and 27.6 g·kg⁻¹ in 2100, representing increases over the initial SOC content of 84.8% and 109.1%, respectively.

Keywords Soil organic carbon; DNDC model; Black soil; Manure; Gongzhuling

(Received Oct. 11, 2013; accepted Jan. 13, 2014)

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB951501)资助

** 通讯作者: 姚艳敏, 研究方向为土地资源遥感。E-mail: yao.ym@263.com

王德营, 研究方向为农业资源遥感。E-mail: wdyletian@163.com

收稿日期: 2013-10-11 接受日期: 2014-01-13

土壤有机碳是土壤肥力的核心^[1], 尤其活性有机碳对调节土壤养分有较大影响并与土壤内在的生产力高度相关^[2]。另外由于土壤有机碳库储量巨大(约 1.5 万亿 t, 为大气碳库的 2 倍), 其较小幅度的变动都可通过向大气排放温室气体直接影响全球气候变化^[3-5]。可见农田土壤有机碳的变化同时影响着土壤肥力和区域甚至全球气候变化, 当前耕地土壤的退化尤其土壤有机碳下降已经成为一个严重问题^[6-8]。

土壤有机碳的变化取决于土壤碳输入和输出之间的平衡。化肥的施用可以保持土壤肥力, 维持作物生长过程中的养分需求, 可间接增加土壤中碳的存留时间; 有机肥的施用可以改善土壤团聚体结构, 提升土壤中微生物的活性, 增加土壤有机碳的含量^[9-11]。这些已有的研究结论为通过控制施肥措施实现遏制土壤有机碳下降以及培肥土壤提供了理论依据。

然而土壤有机碳的转变过程非常缓慢, 传统的定位试验研究不可避免地存在着时间和空间上的局限性。随着研究手段的发展, 土壤有机碳模型被成功应用于长期定位试验观测数据的整合预测中^[12]。目前已有 10 多个相关模型发表, 较成熟的有 DNDC、CENTURYE、NCSOIL 和 RothC 等。其中 DNDC 模型因其比较精确的模拟和简单的参数输入被广泛应用。该模型目前已在世界许多地区得到验证并开展了应用研究, 而在我国的推广应用开始于 20 世纪 90 年代后期, 多集中用于模拟农业活动对温室气体排放的影响及其带来的有机碳储量的变化。金琳、王立刚等^[13-17]也都验证了在部分区域、土壤类型下 DNDC 模拟有机碳变化的可行性。本文以吉林省公主岭黑土长期定位试验站为例, 采用 DNDC 模拟不同施肥管理措施下黑土土壤有机碳的变化, 预测未来黑土土壤有机碳的变化规律, 为黑土土壤培肥和土壤碳循环研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 DNDC 模型简介

由 Li 等^[18-20]建立的 DNDC 模型即脱氮(denitrification)分解(decomposition)模型, 最早以土壤反硝化作用和分解作用为主要过程。该模型是国际上最成功的模拟生物地球化学循环的模型之一^[21]。DNDC 模型由土壤气候、植物生长、有机质分解、硝化、脱氮和发酵 6 个子模型组成^[22]。当模拟某一地点上的生物地球化学过程时, 需要该点位的气象、土壤、作物、耕作措施等输入参数支持, 可模拟得到土壤物理化学环境条件、植物生长状况、土壤碳

氮库及土壤-大气界面的碳氮交换通量的情况^[23]。

1.2 试验设计

试验地点位于吉林省公主岭市的中国农业科学院黑土土壤长期定位试验站。该试验站地处东经 124°48′、北纬 43°30′、海拔 220 m, 属于中温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温 4~5℃, 年降雨量 1 200~1 600 mm, 年日照时数 2 500~2 700 h, 无霜期 130~140 d。

试验站 1989 年初始黑土(0~20 cm)基本性状为: 有机碳 13.2 g·kg⁻¹, 全氮 1.4 g·kg⁻¹, 全磷 0.6 g·kg⁻¹, 有效磷 11.79 mg·kg⁻¹, 速效钾 158.3 mg·kg⁻¹, pH 8.7。种植作物为春玉米连作。本文选择 1990—2005 年试验站 3 个施肥处理和 1 个对照处理进行分析研究: 1) 不施肥的对照处理(CK); 2) 单施化肥处理(NPK), 其中每公顷施 N 165 kg、P₂O₅ 82.5 kg、K₂O 82.5 kg; 3) 配施有机肥处理(NPKM), 每公顷施 N 50 kg、施 P₂O₅ 82.5 kg、施 K₂O 82.5 kg, 施用等效 N 含量为 115 kg 的有机粪肥; 4) 增施有机肥处理(M2+NPK), 每公顷施 N 165 kg、施 P₂O₅ 82.5 kg、施 K₂O 82.5 kg, 另外增施等效 N 含量为 150 kg 的有机粪肥。各处理中化肥的施用形式为 1/3 做底肥, 其他 2/3 用作追肥, 有机粪肥仅考虑等效 N 的含量并以底肥形式施用。详细记录玉米每年的播种收获时间, 每年玉米收获后采集土样, 在实验室测量土壤有机碳含量。

1.3 基本输入参数获取

气象数据: 模型所需每日的降水、最高温、最低温、风速数据来源于国家气象局 1990—2005 年的国家气象站点数据, 以距离试验站最近的地面气象观测站数据代替。

土壤和产量数据: 主要包括黑土的土壤容重、质地、有机碳、pH 等数据, 来源于试验站的实际测量数据。

作物以及田间管理数据: 包括作物种植种类、翻耕、化肥施用、有机肥施用等主要数据, 均来自于试验站 1990—2005 年的田间管理措施记录。

1.4 模型验证

模型验证的目的是检验 DNDC 模拟土壤有机碳变化的可行性。本研究从相关系数 r 、均值差 M 和相对 $RMSE$ (root mean square error)3 个指标来验证 DNDC 模拟的符合度^[24-25]。其中 $RMSE$ 的计算公式为:

$$RMSE_n = \frac{100}{OBS_i} \sqrt{\sum (OBS_i - SM_i)^2 / n} \quad (1)$$

式中, OBS_i 为观测值, SM_i 为模拟值, n 为样本容量。 $RMSE$ 的值越小, 表明模拟值与实际值的一致性越

好。模拟值与观察值之间的偏差越小, 模拟的结果越准确可靠。一般参考如下: $RMSE < 10\%$, 表明模拟值与预测值一致性非常好; 在 $10\% \sim 20\%$ 之间为较好; 在 $20\% \sim 30\%$ 之间表明模拟效果一般; $> 30\%$ 则表明模拟值与实际值偏差大, 模拟效果差。

1.5 模型敏感度计算方法

农田土壤有机碳的含量与变化是外界气候条件和人为耕作管理措施共同作用的结果。因此, 采用 DNDC 模型预测未来土壤有机碳的变化规律之前, 需要进行土壤有机碳对气候和耕作管理方式的敏感性分析, 以便获得影响土壤有机碳的敏感因子, 设置合理的敏感因子变化情景, 预测未来土壤有机碳的变化。本研究采用模型模拟的方法, 在传统耕作(采用 NPK 处理作为传统耕作情景)、实际气象条件的基础上, 改变气象因子及主要的耕作条件, 分析各因子对该地区黑土土壤有机碳的影响程度。变更的因子, 包括日平均气温、日平均降水量、化肥施用量(FT)、有机肥施用量(MN)、秸秆还田率(CR)。

本研究中各因子的变更系数依次为: 化肥施用量为基础条件的 25%、50%、150%、200%, 有机肥施用量的变更系列为 $500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $1\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $2\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $3\ 000 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 秸秆地上部分的还田量为 10%、20%、30%、40%, 温度的变更系列为相对于实际日平均气温增加 0.25、0.5、1.0、2.0, 降水的变更系列为相对于实际日降水量增

加 0.1 cm、增加 0.05 cm、减少 0.05 cm、减少 0.1 cm。

1.6 预测方法

土壤内有机质组分的转换过程一般需要几十年, 甚至上百年, 因此研究不同施肥措施对土壤有机碳的影响需要一个长时间的预测分析。本文利用 DNDC 模型进一步模拟了 100 年内 4 种施肥处理下土壤有机碳的变化趋势。总的模拟时间区间为 1990—2110 年。模拟中耕作管理措施假设每年相同, 2011—2100 年的气象数据为 1991—2010 年的 5 次重复。

2 结果与分析

2.1 不同施肥措施对土壤有机碳的影响

对试验站 1990—2005 年 3 个施肥处理和 1 个对照处理的有机碳变化进行分析, 结果显示(图 1): 16 年土壤有机碳(SOC)平均值以不施肥对照处理(CK)最低, 仅为 $12.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 稍低于 SOC 初始值($13.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$); 单施化肥处理(NPK)SOC 平均值 $13.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 稍高于初始值; 配施有机肥(NPKM)、增施有机肥(M2+NPK)两个处理平均值分别为 $16.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $16.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较试验初始土壤的 SOC 含量分别升高约 23%和 28%。

划分不同时间段来分析 SOC 的变化(表 1), 结果显示: 不施肥对照(CK)和单施化肥(NPK)两个处理中, 不同时间段 SOC 的含量主要呈现波动状态, 并不存在明显的上升或下降的趋势。因此可以认为

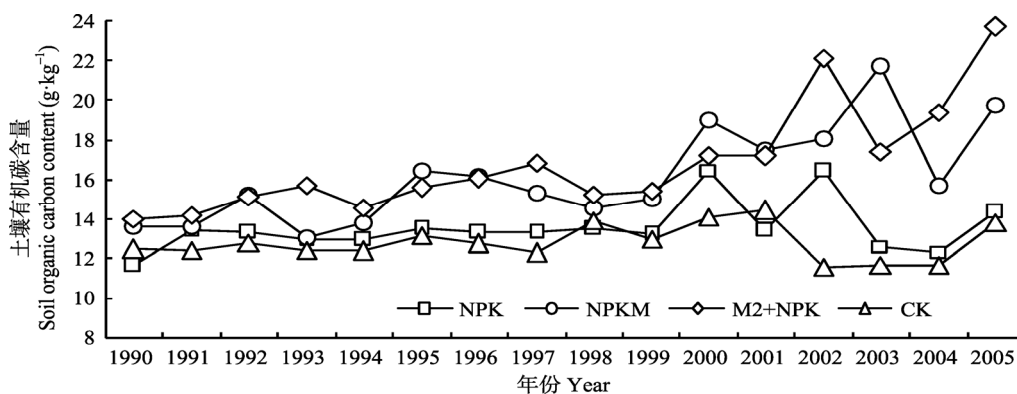


图 1 不同施肥措施下土壤有机碳含量的变化(1990—2005)

Fig. 1 Changes of soil organic carbon content under different fertilization treatments (1990—2005)

表 1 不同施肥措施下土壤平均有机碳含量的差异(1990—2005)

Table 1 Changes of the average soil organic carbon content under different fertilization treatments (1990—2005) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理 Treatment	1990—1993	1994—1997	1998—2001	2001—2005	1990—2005
M2+NPK	14.8±0.81a	15.8±0.94a	16.3±1.07a	20.7±2.81a	16.9±2.74a
NPKM	13.9±0.95ab	15.5±1.21a	16.6±2.10a	18.9±2.59ab	16.2±2.48a
NPK	12.9±0.84b	13.3±0.22b	14.2±1.54b	14.0±1.88bc	13.6±1.28b
CK	12.5±0.20b	12.7±0.42c	13.9±0.64b	12.2±1.08c	12.8±0.89c

同列数据后不同小写字母表示该时间段内处理间差异达 5% 显著水平。为排除产量本身的年际波动影响, 研究中用的显著性检验方法为配对 t 检验。下同。Different lowercase letters mean significant difference among treatments at 5% level, significant test method was paired t test to eliminate the effect of inter annual fluctuation of yield. The same below.

在这两种施肥措施下, SOC 已经到达一个相对稳定的状态。配施有机肥(NPKM)、增施有机肥(M2+NPK)两个处理的 SOC 平均值明显高于其他两个处理, 且 SOC 含量明显存在不断上升趋势。这也说明 1990—2005 年试验站土壤有机碳的变化分析研究仍不能完全描述施肥措施对 SOC 的长期影响情况, 这也是本文后续 DNDC 模拟研究的初衷之一。

为明确有机肥施用对作物产量的影响, 对试验站 1990—2005 年 3 个施肥处理和 1 个对照处理的春玉米产量变化进行分析, 结果显示(图 2, 表 2): 16 年 CK 处理春玉米产量最低, 平均产量只有 3 445 kg·hm⁻² 且总体呈现递减趋势, 而施用肥料对作物的增产效果极显著。施化肥处理(NPK)、配施有机肥处理(NPKM)、增施有机肥处理(M2+NPK)产量变化趋势

几乎一致, 增施有机肥处理(M2+NPK)产量略高于其他两者。配施有机肥处理(NPKM)从 1998 年(第 9 个试验年)施用有机肥的效果开始体现出来, 作物产量高于单施化肥处理并逼近增施有机肥的效果。配施有机肥处理(NPKM)与施化肥处理(NPK)相比较, 最初几年春玉米不但没有增产, 产量还略低与后者。主要原因可能是: 一方面有机肥中养分多以有机态形式存在, 而可被植物迅速利用的矿质态养分相对较少; 另一方面施用有机肥的土壤 C/N 相对较高, 导致有机肥分解初期微生物繁殖生长表现为缺氮, 微生物从土壤中吸收矿质氮素形成与植株的氮素竞争关系。因此导致较短年限内, 配施有机肥处理相对于单施化肥处理非但不能达到增产效果, 甚至还存在减产现象。

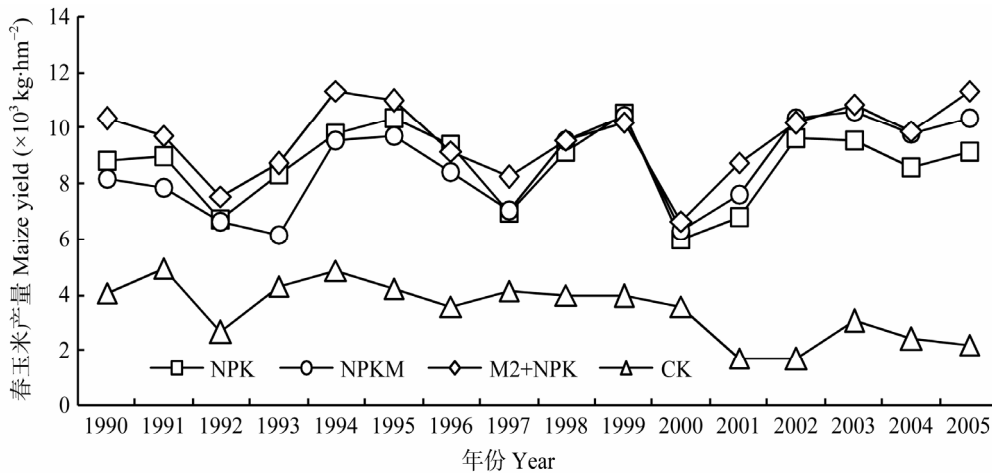


图 2 不同施肥处理的春玉米产量差异(1990—2005)

Fig. 2 Changes of the maize yield under different fertilization treatments (1990—2005)

表 2 不同施肥处理春玉米多年平均产量差异(1990—2005)

Table 2 Changes of the average yield of maize under different fertilization treatments (1990—2005) kg·hm⁻²

处理 Treatment	1990—1993	1994—1997	1998—2001	2001—2005	1990—2005
M2+NPK	9 068±1 229a	9 920±1 482a	8 787±1 531a	10 562±659a	9 584±1 350a
NPK	8 211±1 026b	9 114±1 515ab	8 124±2 101a	9 235±499b	8 671±1 370b
NPKM	7 185±981b	8 680±1 230b	8 481±1 845a	10 272±332a	8 654±1 575b
CK	3 979±959c	4 178±530c	3 290±1 075b	2 335±567c	3 445±1 044c

2.2 模型验证

从各处理的验证结果图(图 3)可以看出, 土壤有机碳的模拟值和实测值偏移都比较小。采用相对 RMSE 和线性回归方法进一步分析模型偏差度。从表 3 看出, 所有处理的 RMSE 值均小于 10%, 均值差也很小且相关性显著, 土壤有机碳模拟值与观测值具有较好的一致性。因此, 应用 DNDC 模型模拟预

测吉林省公主岭黑土不同施肥措施下的土壤有机碳变化趋势是可行的。

2.3 土壤有机碳对气候因子与管理方式的敏感性分析

图 4 为各因子变更系列土壤有机碳的年均变化量, 可以明显看出相对于气候因子的波动, 主要田间管理措施的改变对土壤有机碳含量的影响更大。其中有机肥的施用对有机碳含量的影响最

大, 随着有机肥使用量的增加, 土壤有机碳增加的幅度越大, 且这种影响是持久的; 其次为秸秆还田率, 还田率越高则有机碳含量也越高; 而化肥的施用对于土壤有机碳的变化影响较小; 气候变

化因子中, 温度的升高和降水的减少会使有机碳含量有一定程度的降低。综合来看, 不同的农田管理措施(尤其有机肥的施用)对土壤有机碳的变化影响最大。

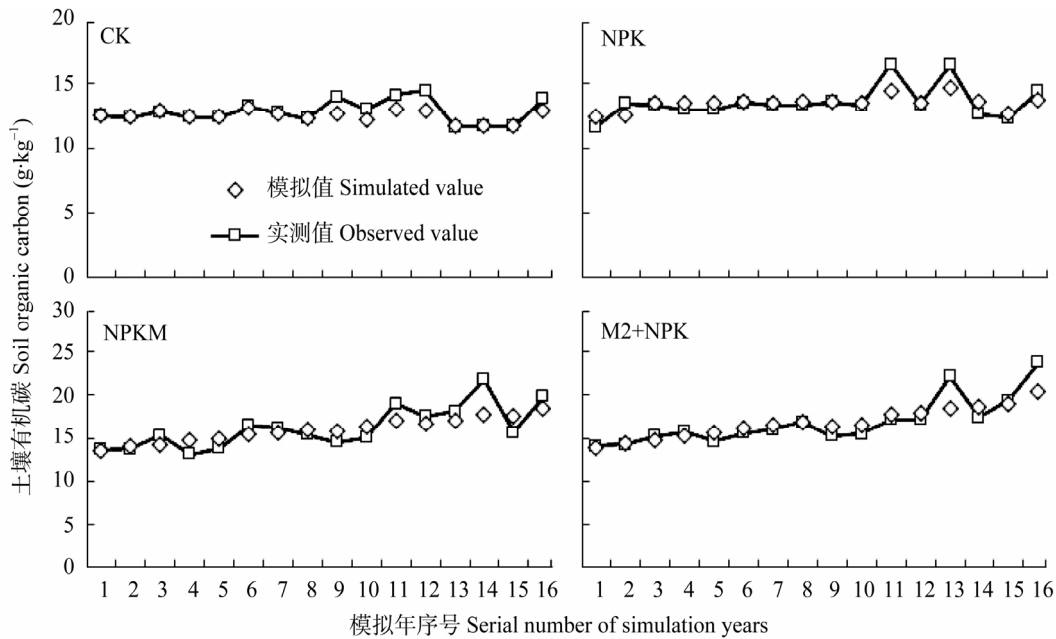


图 3 不同施肥处理土壤有机碳的模拟值和实测值对比

Fig. 3 Simulated and observed values of soil organic carbon contents under different fertilization treatments

表 3 不同施肥处理的模型验证结果

Table 3 Results of model checking for soil organic carbon content stimulation under different fertilization treatments

处理 Treatment	n	M	R	RMSE (%)
CK	16	0.344 9	0.677 1	5.09
NPK	16	0.084 4	0.691 6	6.11
NPKM	16	0.243 7	0.663 2	9.39
M2+NPK	16	0.133 9	0.764 6	8.36

2.4 模型预测

模拟结果(图 5)表明, 不施肥处理(CK)土壤有机碳存在缓慢下降趋势, 至 2100 年土壤有机碳含量为 $11.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 较 2011 年($12.35 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)下降约 6.5%, 较第 1 个试验年(1990 年)土壤有机碳($12.49 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)下降约 7.5%, 较试验前(1989 年)土壤初始有机碳

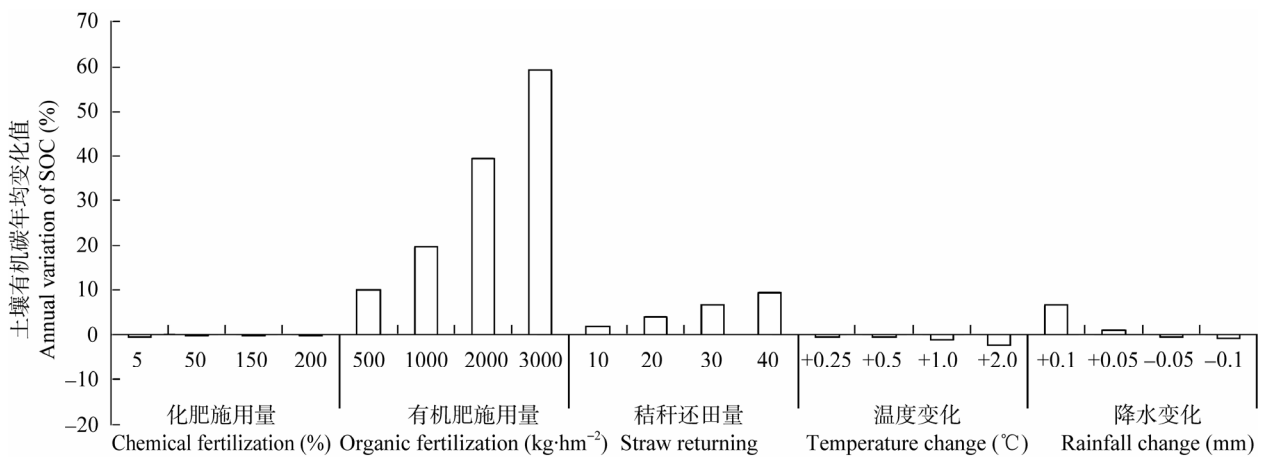


图 4 土壤有机碳对气候因子与主要田间管理措施的敏感度分析

Fig. 4 Sensitive test on the impact of climate and management alternatives on the changes of soil organic carbon (SOC) content 化肥施用量为基础条件的比例。Chemical fertilization is percentage of basic fertilization rate.

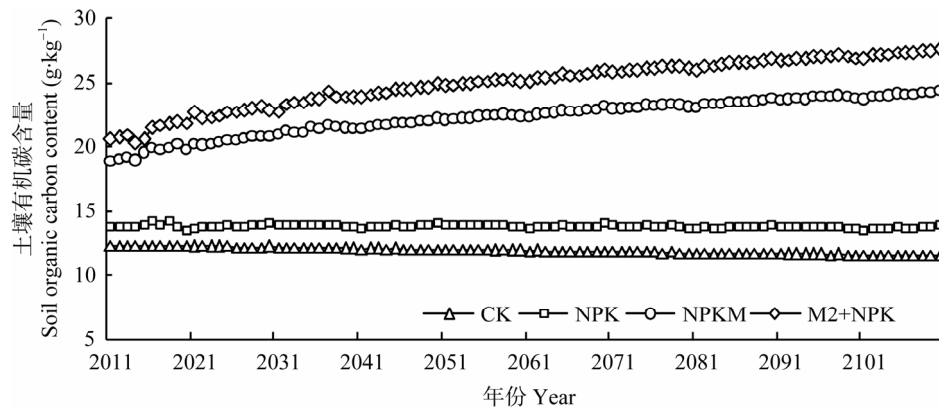


图 5 不同施肥处理下 0~20 cm 土层有机碳含量的变化模拟(2011—2100)

Fig. 5 Simulated changes of soil organic carbon content (0–20 cm) under different fertilization treatments from 2011 to 2100

($13.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)下降约 12.5%。单施化肥处理(NPK)土壤有机碳含量较为稳定,这是由于 NPK 的配合施用保证了作物的高生物量,进而增加了作物根茬以及残枝落叶的还田量,使得土壤中有有机碳的剩余量基本与分解量持平,表现为有机碳含量并未出现下降。配施有机肥(NPKM)及增施有机肥(M2+NPK)两个处理中有机质的上升趋势明显,至 2100 年土壤有机碳含量分别为 $24.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $27.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 2011 年 ($18.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)有机碳上升 29.1%和 34.0%,而较土壤初始有机碳上升 85%和 109%。

3 讨论与结论

1990—2005 年 16 年大田试验表明:不同施肥处理土壤在 16 年后土壤有机碳含量高低顺序为 $\text{M2+NPK} > \text{NPKM} > \text{NPK} > \text{CK}$ 。其中 M2+NPK 和 NPKM 处理土壤有机碳呈不断上升趋势,且两个处理间无显著差异;CK 和 NPK 处理土壤有机碳含量平稳;增施有机肥和配施有机肥两个处理最终都使春玉米产量提高,可见施用有机肥的培肥地力措施理论上可以通过产量效益来弥补人工投入的增加;但如果从较短的时间段(<4 年)分析,与增施有机肥不同,有机肥配施处理不仅会带来人工投入的增加,在产量方面的表现也不如单施化肥处理,这使得这种实际上最合理的施肥方式在农户推广应用时必然会遇到阻力。

模型的验证结果表明:应用模型模拟该地区黑土有机碳含量是准确且可行的。在此基础上进行的敏感性测试结果表明:有机肥的施用对该地区土壤有机碳含量的影响幅度远大于其他因素,并且有机肥施用带来的这种影响具有持久性。

进一步利用 DNDC 模型模拟预测不同施肥措施对吉林省公主岭黑土(0~20 cm)100 年土壤有机碳的影响,结果表明:在长时间尺度上(100 年),CK 处理存在土壤有机碳含量下降的趋势;NPK 处理土壤有机碳含量保持较为稳定;M2+NPK 和 NPKM 处理土

壤有机碳增加明显,但增加速度随时间推移不断减缓。总体来看在该地区长期合理地施用化肥(保证玉米根部还田)的田间管理并不会导致有机碳含量降低,但也无益于增加碳储量以及提高土壤肥力;不施或不合理施用化肥才是目前导致土壤有机碳含量下降的主要原因;另外增施或配施有机肥对于增加碳储量培肥地力的意义重大,尤其配施有机肥的措施很有可能通过长时间尺度上的增产效益弥补投入成本的增加,使得该措施具有实际的可推广性。

参考文献

- [1] 赵明东, 罗晓红, 刘淑霞. 土壤活性有机碳养分有效性与作物产量的关系[J]. 安徽农业科学, 2006(4): 732–733
Zhao M D, Luo X H, Liu S X. Relationship between active soil organic carbon, nutrient bioavailability and crop yield[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006(4): 732–733
- [2] 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 improve soil productivity [J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(4): 311–315
- [3] 刘淑霞, 刘景双, 赵明东, 等. 土壤活性有机碳与养分有效性及作物产量的关系[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(5): 539–543
Liu S X, Liu J S, Zhao M D, et al. Relationship between active soil organic carbon, nutrient bioavailability and crop yield[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2003, 25(5): 539–543
- [4] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 土壤, 2000, 32(1): 12–18
Jin F, Yang H, Zhao Q G. Advances in researches on soil organic carbon storages and affecting factors[J]. Soils, 2000, 32(1): 12–18
- [5] 李甜甜, 季宏兵, 孙媛媛, 等. 我国土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2007, 28(1): 93–97
Li T T, Ji H B, Sun Y Y, et al. Advances in researches on soil organic carbon storages and affecting factors in China[J].

- Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2007, 28(1): 93-97
- [6] 赵荣钦, 秦明周, 黄爱民. 耕地土壤碳固存的措施与潜力[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 81-84
Zhao R Q, Qin M Z, Huang A M. Practices and potential of cropland to sequester carbon[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(1): 81-84
- [7] 高崇升, 王建国. 黑土农田土壤有机碳演变研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1468-1474
Gao C S, Wang J G. A review of researches on evolution of soil organic carbon in mollisols farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(6): 1468-1474
- [8] 骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 676-684
Luo K, Hu R G, Zhang W J, et al. Response of black soil organic carbon, nitrogen and its availability to long-term fertilization[J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 676-684
- [9] 王丽宏, 胡跃高, 杨光立, 等. 农田冬季覆盖作物对土壤有机碳含量和主作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 64-67
Wang L H, Hu Y G, Yang G L, et al. The effect of winter cover crop on soil organic carbon and crop yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(6): 64-67
- [10] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 154-161
Qiu J J, Wang L G, Li H, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. 2009, 42(1): 154-161
- [11] 龙军, 毛艳玲, 张黎明, 等. 农田土壤有机碳演变模型的研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(5): 232-239
Long J, Mao Y L, Zhang L M, et al. Advances of soil organic carbon model in farmland ecosystem[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(5): 232-239
- [12] 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 agro-ecosystem carbon pool in China and the US[J]. Quaternary Sciences, 2000(4): 345-350
- [13] 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(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 1000 by DNDC[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010(5): 1081-1085
- [14] 王丹丹, 周亮, 黄胜奇, 等. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 735-740
Wang D D, Zhou L, Huang S Q, et al. Short-term effects of tillage practices and wheat-straw returned to the field on topsoil labile organic carbon fractions and yields in central China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(4): 735-740
- [15] 王立刚, 邱建军, 马永良, 等. 应用 DNDC 模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(6): 15-19
Wang L G, Qiu J J, Ma Y L, et al. Apply DNDC model to analysis long-term effect of soil organic carbon content under different fertilization and plough mode[J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(6): 15-19
- [16] 张迪, 韩晓增. 长期不同植被覆盖和施肥管理对黑土活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2715-2723
Zhang D, Han X Z. Changes of black soil labile organic carbon pool under different vegetation and fertilization managements[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(13): 2715-2723
- [17] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 277-282
Zhang R, Zhang G L, Ji Y Y, et al. Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2013, 34(1): 277-282
- [18] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D9): 9759-9776
- [19] Li C S, Aber J, Stange F, et al. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. Model development[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2000, 105(D4): 4369-4384
- [20] Li C S, Frolking S, Harriss R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(3): 237-254
- [21] 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
- [22] 李长生. 生物地球化学的概念与方法——DNDC 模型的发展[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 89-99
Li C S. The conceptions and approaches of biogeochemical model: The advances of DNDC[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(2): 89-99
- [23] 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
Batur 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
- [24] 孙玉桃, 廖育林, 郑圣先, 等. 长期施肥对双季稻种植下土壤有机碳库和固碳量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 732-740
Sun Y T, Liao Y L, Zheng S X, et al. Effects of Long-term fertilization on soil organic carbon pool and carbon sequestration under double rice cropping[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 732-740
- [25] 陈长青, 胡清宇, 孙波, 等. 长期施肥下石灰性潮土有机碳变化的 DNDC 模型预测[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1410-1417
Chen C Q, Hu Q Y, Sun B, et al. Simulating trends in soil organic carbon of in calcareous Fluvo-aquic soil under long-term fertilization using the DNDC model[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilize, 2010, 16(6): 1410-1417