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

贺美1,王迎春1,王立刚1*,朱平2,李长生1,3

(1中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部面源污染控制重点实验室/中国农业科学院-美国新罕布什尔 大学可持续农业生态系统研究联合实验室,北京100081;2吉林省农业科学院农业环境与资源研究所,长春130033; 3美国新罕布什尔大学地球海洋与空间研究所,Durham NH 03824)

摘要:【目的】探索长期不同施肥方式下土壤有机碳的动态变化及其与作物产量之间的耦合关系,以期为东北 地区黑土耕地资源的持续利用与管理提供科学依据。【方法】基于黑土区国家土壤肥力与肥料效益监测网站公 主岭监测基地的 23 年长期定位试验数据,选取不施肥 (CK)、单施氮磷钾肥 (NPK)、无机肥配施低量有机肥 (NPKM1)、1.5 倍的无机肥配施低量有机肥 [1.5 (NPK)M1]、无机肥配施高量有机肥 (NPKM2) 和无机肥配施秸秆 (NPKS) 6 个处理进行土壤有机碳和产量的分析,将数据用于 DNDC 模型验证,并对 6 种施肥处理在未来气候下 (40 a) 黑土有机碳的演变进行模拟。【结果】试验监测结果表明:从 1990~2012 年的土壤有机碳数据分析得 出,长期不施肥土壤有机碳从12.49 g/kg 以年均0.69%的速率下降,有机无机配施可以提升土壤有机碳含量。 DNDC 验证结果如下: DNDC 验证土壤有机碳时各处理的相对均方根误差 (RMSE) 为 14.98%~37.91%, 验证作 物产量时各处理的 RMSE 为 8.28%~11.19%,说明模型能够基本反映长期不同施肥下的作物产量和土壤有机碳 的变化。未来气候下的模拟结果表明: CK 和 NPK 处理土壤有机碳在未来 40 年里分别下降 16.67% 和 11.21%。 而 3 个化肥有机肥配施处理在未来 40 年呈稳定增长态势, NPKM1、1.5 (NPK) M1 和 NPKM2 处理的土壤有机 碳将分别增加 13.65%、15.74% 和 15.84%, 以 1.5 (NPK)M1 增势最为显著。NPKS 处理的有机碳相对初始略有 增加。当施氮量从 160 kg/hm² 增至 320 kg/hm² 时, 土壤有机碳每增加 1.00 g/kg, 作物产量的增加量从 44.48 kg/hm²下降至15.95 kg/hm²。【结论】从长期实测数据的分析和 DNDC 模型模拟得出,实施秸秆还田和有机肥 配施无机肥能有效持续增加 SOC 含量,并能获得较高的作物产量。在施氮量 160~320 kg/hm² 水平下,作物产 量随着土壤有机碳含量的增加而升高,且土壤有机碳含量对产量的提升幅度随着施氮量的升高而降低。 关键词: DNDC 模型;长期施肥;土壤有机碳;农田生产力

Using DNDC model to simulate black soil organic carbon dynamics as well as its coordinate relationship with crop yield

HE Mei¹, WANG Ying-chun¹, WANG Li-gang^{1*}, ZHU Ping², LI Chang-sheng^{1,3}

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture/CAAS-UNH Joint Laboratory for Sustainable Agro-ecosystem Research, Beijing 100081, China; 2 Institute of Agricultural Resources and Environment Research, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 3 Institute for the Study of Earth, Ocean and Space, University of New Hampshire, NH 03824, USA)

Abstract: [Objectives] The effects of long-term fertilization on black soil organic carbon content and crop yield were researched and stimulated using the DNDC model in Northeast China, which will provide a scientific basis for the sustainable use of the arable land resources and scientific managements in the region. **[Methods]** Data were collected from the long-term experiments carried out in National Fertility Monitoring Net in Gongzhuling City, Jilin Province. Six of the fertilization treatments were chosen to analyze the changes in soil

收稿日期: 2016-04-11 接受日期: 2016-05-26

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303126-2, 201303103);国家重点研发计划项目(2016YFED101100)资助。

作者简介: 贺美(1990—), 女, 河南漯河人, 硕士研究生, 从事农田土壤碳循环研究。E-mail: hemei0911@126.com * 通信作者 E-mail: wangligang@caas.cn

organic carbon (SOC) and crop yield, including: no fertilizer (CK), only chemical fertilizer application (NPK), combining chemical and low levels of organic manure (NPKM1), 1.5 times of the amount of inorganic and organic fertilizer of NPKM1 (1.5(NPK)M1), combining chemical and high amount of organic manure (NPKM2), inorganic fertilizer plus straw (NPKS), and the DNDC model was validated using these data. The model was used to imitate the variation of SOC in the coming 40 years under the six fertilization treatments. [Results] The root mean square error (RMSE) of SOC in treatment was in range of 14.98%-37.91%, those of crop yields were in range of 8.28%–11.19%, which suggested that the simulated values were consistent with the observed values. so the DNDC model was reliable for the simulation purpose in the studied area. The simulated results indicated that the SOC in CK and NPK treatments would drop by 16.67% and 11.21% respectively, and those in NPKM1, NPKM2 and 1.5(NPK)M1 treatments would be steadily increasing in the next 40 years, with the most significant growth in treatment of 1.5 (NPK)M1. The SOC contents in NPKM1, 1.5 (NPK)M1 and NPKM2 will be increased by 13.65%, 15.74%, 15.84% from 2010 to 2050 respectively. The measured SOC content in NPKS treatment had slightly increased since the beginning of the experiment. When the nitrogen application was increased from 160 kg/hm² to 320 kg/hm², the SOC would simultaneously increase in magnitude of 1.00 g/kg, and the crop yields increase would drop from 44.48 kg/hm² to 15.95 kg/hm². [Conclusions] Analyzation of data from the measured and DNDC model simulated, combined application of straw, manure and inorganic fertilizer will be effective in increasing the content of soil organic carbon continuously, and leading to steadily increase of crop yields at the same time. When the nitrogen application rate is between 160 kg/hm²-320 kg/hm², the crop yields will keep increasing with the increasing of soil organic carbon content, and the hoist scope of SOC in increasing crop yield would fall with the increase of nitrogen application rate.

Key words: DNDC model; long-term fertilization; soil organic carbon; farmland productivity

土壤有机碳 (SOC) 在农业生态系统中的功能以 及土壤肥力方面发挥重要作用^[1-2]。全球土壤碳库储 量 1500 Gt,约为大气碳库的 2 倍,它的微小变化就 会引起大气 CO₂ 浓度的显著波动^[3-4],合理的农田管 理措施如施肥、秸秆还田以及耕作等可以实现农田 土壤碳汇功能^[5]。东北地区是我国重要的商品粮基 地^[6-7],2015 年黑龙江和吉林两省的粮食产量约占全 国粮食总产的 15%,也是世界上仅有的三大黑土带 之一,有机碳储量 12.6×10° t,占全国 SOC 储量的 28.3%,黑土区由碳源向碳汇的转变将对全球气候变 化产生重要影响^[8-10]。

SOC 含量是由输入和输出之间的平衡决定的。 大量研究表明,化肥可以增加土壤速效养分含量, 提高作物产量,有机肥可以协调植物生长的水、 肥、气、热,改善土壤结构,提高土壤微生物活 性,增加 SOC 含量^[11-14]。有机肥无机肥配合施用在 培肥土壤、增加有机质含量以及增产增收方面效果 显著^[15-16]。秸秆还田可以提高土壤固碳潜力,与化肥 配合施用可以改善土壤结构,提高作物产量,减缓 地力衰竭^[17-18]。近年来,SOC 含量对作物产量的效应 也越来越受到关注,高 SOC 含量与产量、稳产性之 间具有显著相关性^[19-20],徐明岗等^[21]研究发现 SOC 每提高 1 g/kg,作物的稳产性提高 10%~20%; Pan 等^[12] 通过分析 1949~2000 年的全国各省 SOC 与产 量数据,得出大部分省 SOC 含量与作物产量及稳产 性成正相关关系的结论。但是大部分关于 SOC 与作 物产量协同效应的研究均未能将环境因素对农田生 产力的影响剔除,如何有效控制其他因变量,独立 分析不同 SOC 水平下的作物产量变化态势,是研究 SOC 与作物产量之间协同效应的关键。

SOC 的周转过程非常缓慢,它对环境条件的动态响应和自身转化的过程具有复杂性,现有的田间试验由于时间和空间的局限,不足以揭示长期不同管理措施下农田 SOC 的动态变化,并且,在大田试验中,难以找到生态条件相同但土壤肥力不同的田块来开展 SOC 与作物产量关系的定量研究。随着研究手段的发展,一些陆地生态系统模型被成功的用于 SOC 的预测中,较为成熟的方法有 DNDC、CENTURYE、RothC 等,其中 DNDC 模型因强大的模拟功能和简单的参数输入以及较为精准的模拟在世界范围内被广泛应用^[23-30]。公主岭市处于吉林省中西部,在当地有"玉米之乡"之称,属于寒温带半干旱半湿润气候区,有机质含量偏低,是典型瘠薄黑土区,本研究通过应用 DNDC 模型控制农田生态

11

系统中的复杂变量,利用国家土壤肥力与肥料效益 监测网黑土试验点吉林省公主岭的长期定位试验, 分析长期不同施肥措施对 SOC 及作物产量的影响, 在调试和验证模型的基础上预测黑土有机碳未来变 化趋势并分析 SOC 与农田生产力的协同关系,为东北 地区黑土耕地资源的持续利用与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于国家黑土肥力与肥料效益监测基地 吉林省公主岭市,成土母质为第四纪黄土状沉积 物,地势平坦,是典型黑土区。年平均气温4~5℃, 4~5月平均气温为7~16℃,6~8月份气温在 19~25℃,9月份在16℃左右,年最高气温34℃, 最低-35℃,有效积温在2600~3000℃,年降水量 450~650 mm,年蒸发量1200~1600 mm,无霜期 120~140 d,为一年一季雨养农业区。

试验从 1990 年开始, 初始土壤 (0—20 cm) 的理 化性状: 容重 1.19 g/cm³、有机碳 13.2 g/kg、全氮 1.4 g/kg、有效磷 11.79 mg/kg、速效钾 158.33 mg/kg、pH 值 7.6、田间持水量 35.8%、孔隙度 53.4%、粘粒含量 (<0.02 mm) 31%。种植模式为春 玉米连作,试验开始以来供试玉米品种: 1991~ 1994 年为丹玉 13, 1995~1996 年是吉单 304, 1997~1999 是吉单 209, 2000~2003 是四密 25, 2004~2005 是吉单 209, 2006~2012 为郑单 958。

1.2 试验设计

本研究选择长期定位试验的 6 个处理: 1) 对照 处理不施肥 (CK); 2) 单施化肥 (NPK); 3) 化肥低量 有机肥 (NPKM1); 4) 1.5 倍的化肥低量有机肥 [1.5 (NPK)M1]; 5) 化肥配施高量有机肥 (NPKM2); 6) 化 肥配施秸秆 (NPKS),各处理施肥量见表 1。试验小 区面积 400 m²。有机肥 (M) 为猪厩肥,自 2005 年后 换成牛粪,S 为玉米秸秆。各处理中磷钾肥播种前作 为底肥一次性施入,氮肥 1/3 播种前用作底肥,2/3 于拔节期追施,有机肥于玉米收获后施入地里,前 一年的作物秸秆在第二年粉碎后于 6 月下旬撒施于 垄沟里。在收获时各处理地上留茬 15 cm,并同根茬 一起还田。播种时间在每年 4 月 21~30 日,收获时 间大约 9 月 21~30 日,生育期 150 天左右。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤样品的采集与测定 土壤样品采集是在每 一年作物收获后,在每个小区按梅花形五点法采集

表 1 各处理施肥量 Table 1 Fertilizer application amount in each treatment

处理	Ν	P_2O_5	K_2O	厩肥 Manure	秸秆 Straw	
Treatment		(kg/hm ²)		(t/hm ²)		
СК	0	0	0	0	0	
NPK	165	82.5	82.5	0	0	
NPKM1	50	82.5	82.5	23	0	
1.5 (NPK)M1	75	123.75	123.75	34.5	0	
NPKM2	165	82.5	82.5	30	0	
NPKS	112.125	82.5	82.5	0	7.5	

0—20 cm 土层土样并混匀, 经筛选后自然风干, 磨碎过筛后测定。每小区样品重复测定 3 次,本研究中的长期定位试验数据均为 3 次测定结果的平均值。土壤有机质的测定采用重铬酸钾外加热法^[31]。 1.3.2 作物产量的测定 春玉米成熟后,在每个小区选3个10 m²的样方,将样方内所有玉米棒装袋,晒干后脱粒称重,并测试计算含水量后,折算成公顷产量。

1.4 DNDC 模型简介以及参数获取

DNDC模型是对土壤碳、氮循环过程全面描述的 机理模型,适用于点位或区域的任何气候带下的农 业生态系统。该模型由2个部分6个子模型构成,第 一部分包括土壤气候、农作物生长和有机质分解3 个子模型,第二部分包含硝化、反硝化以及发酵3 个子模型,描述了土壤有机质的产生、分解及转化, 最后以日为单位输出土壤有机碳各组分的含量,以 及 CO₂、CH₄、N₂O等温室气体通量。运行模型需要 的输入数据包括逐日气象数据(来源于国家气象局 1990~2012年气象站点数据)、土壤理化和生物学性 质(来源于试验站1990~2012年的实际监测结果记 录)、土地利用以及农田管理措施等(来源于试验站 1990~2012年的田间管理措施记录),具体见表2。

1.5 模型预测的气候情景设置

SOC 组分在土壤中的转化过程需要几十年甚至 上百年,因此,有必要对不同施肥管理措施下 SOC 的变化趋势进行长时间尺度的模拟研究。本研究利 用 DNDC 模型进一步模拟了 40 年内 6 种田间管理措 施下土壤有机碳的变化,总的模拟时间段为 1990~ 2050 年。气候因素是影响 SOC 更替的重要因子,本 研究以距离公主岭市最近的气象站点四平市日值气 象数据代替,二者相距 64 公里,均处于松辽平原腹 地,气象环境一致性相对较高,2011~2050 年的气 象数据是 1991~2010 年的 2 次重复。

表 2 DNDC 模型输入参数 Table 2 Input parameters of DNDC

项目 Project	输入参数 Input parameters				
地理位置	模拟地点的名称、纬度、模拟的时间尺度				
Geographical location	Simulated place, simulated latitude, simulated timescale				
气象	逐日最高气温、逐日最低气温、逐日降水量				
Weather	Daily highest temperature, daily lowest temperature, daily rainfall				
土壤 Soil	土壤容重、质地、田间持水量、萎蔫点、导水率、孔隙度、粘粒含量、pH 值以土壤表层初始 SOC 含量、土壤 初始铵态氮和硝态氮含量 Soil bulk density, soil texture, field capacity, wilting point, hydraulic conductivity, porosity, clay content, pH and SOC content of topsoil, initial soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen content				
植被	作物种类、复种或轮作类型				
Vegetation	Crop species, type of multiple cropping or rotation				
管理	播种与收获日期,最佳作物产量,耕作次数,时间及深度,肥料种类及用量(包括无机肥、有机肥),施肥次数和日期(包括基肥和追肥),秸秆还田比例及其碳氮比等				
Management	Date of sowing and harvesting, the best yield, the times, date and depth of tillage, kinds and amount of fertilizer (include chemical fertilizer and organic fertilizer), date and time of fertilizer application (include basal fertilizer and				
	operessing), proportion of crop straw return, C/1v of crop straw and so on				

1.6 模型敏感度计算方法

能够评估和减少结果的不确定性是应用模型评价不同施肥措施对 SOC 影响的重要前提。研究中对模型结果的验证主要有平均偏差法、相关系数法、相对误差法和均方根法^[32],本研究主要采用的统计参数是平均绝对误差 MAE (mean absolute error)、相对均方根误差 RMSE (root mean square error)和决定系数 *R*² (coefficient of determination),计算公式如下:

$$MAE_n = \frac{100}{n} \left(\sum_{i=1}^n |OBS_i - SM_i| \right) / OBS_i \qquad (1)$$

$$RMSE_{n} = \frac{100}{OBS_{i}} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (OBS_{i} - SM_{i})^{2} / n}$$
 (2)

$$R^{2} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} (OBS_{i} - OBS_{avg})(SM_{i} - SM_{avg})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (OBS_{i} - OBS_{avg})^{2} \sum_{i=1}^{n} (SM_{i} - SM_{avg})^{2}}}\right)^{2}$$
(3)

式中,OBS_i 是观测值;OBS_{avg} 是平均观测值;SM_i 是 模拟值;SM_{avg} 是平均模拟值;n是样本容量。R² 越 接近于1,表明实测值与模拟值线性相关性越好。 RMSE 的值越小,表明模拟值与实测值的拟合度越 高。模型模拟值与实测值之间的偏差越小,模型的 模拟结果越准确、可靠。一般情况下,RMSE 值小 于10%,即模拟值与实测值一致性非常好,在10%~ 20% 之间表明模拟效果一般,大于30%则表明模拟 值与实际值偏差大,模拟效果不理想^[33]。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥措施下春玉米产量的变化

通过田间原位试验的监测,对 23 年来的 5 个施 肥处理和 1 个对照处理的春玉米产量变化进行分析 (图 1),CK 处理产量最低,平均产量只有 3525 kg/hm², 施用化肥增产显著,NPK 处理平均产量是 8978 kg/hm², 比对照增产 154.70%,氮肥农学效率为 33.05 kg/kg。 NPK、NPKM1、NPKM2 和 1.5 (NPK) M1 以及 NPKS 处理的春玉米产量年际间波动趋势大致相同。 NPKM1、1.5 (NPK) M1、NPKM2 和 NPKS 平均产量 是 9088、9699、9833 和 9021 kg/hm²,分别高出 NPK 处理 1.22%、8.02%、9.52% 和 0.48% (表 3)。

2.2 长期不同施肥措施下土壤有机碳的变化

对试验站 1990~2012 年的 5 个施肥处理和 1 个 对照处理的 SOC 变化进行分析 (图 2),各处理 SOC 含量 NPKM1、1.5 (NPK) M1 和 NPKM2 三个有机肥 处理逐渐升高,CK、NPK、NPKS 处理 SOC 含量变 化相对平稳。经过 23 年的耕种,CK、NPK、NPKM1、 1.5 (NPK) M1、NPKM2 和 NPKS 的 SOC 含量分别是 10.5、11.4、21.4、23.9、21.5 和 12.9 g/kg,1.5 (NPK) M1 处理 SOC 含量高于 CK 处理 127.62%。平均值以CK 处理最低,仅为 12.48 g/kg,并且呈缓慢下降趋势, 2012 年 SOC 含量相对 1990 年降低 18.85%。NPK 处 理的平均值为 13.2 g/kg,稍高于试验初始 SOC 值。 NPKM1、1.5 (NPK) M1 和 NPKM2 三个处理的平均 值分别为 17.23、19.61 和 18.02 g/kg,较试验初始



图 1 1990~2012 年不同施肥措施下春玉米产量的变化 Fig. 1 Changes of maize yields under different fertilizer treatments from 1990 to 2012

	表 3 不同时间段不同施肥处理春玉米平均产量 (kg/hm ²)
Table 3	Average maize yield in different periods under different fertilization treatments

处理 Treatment	1990~1994	1995~1999	2000~2004	2005~2009	2010~2012	1990~2012
СК	3957 ± 872 b	$3770 \pm 244 \text{ b}$	2413 ± 815 b	3218 ± 695 b	$4754\pm1584~b$	3524 ± 1072 b
NPK	8422 ± 1575 a	9120 ± 1783 a	7894 ± 1587 a	9249 ± 1779 a	11023 ± 724 a	8978 ± 1743 a
NPKM1	7587 ± 1835 a	8891 ± 1719 a	8696 ± 1738 a	9954 ± 1475 a	11125 ± 491 a	9088 ± 1846 a
1.5 (NPK) M1	8554 ± 2292 a	9936 ± 1501 a	9018 ± 1457 a	10293 ± 1938 a	11357 ± 297 a	9699 ± 1820 a
NPKM2	9362 ± 1896 a	9456 ± 1338 a	$8828 \pm 2075 \text{ a}$	10756 ± 1741 a	11383 ± 404 a	9833 ± 1778 a
NPKS	$7789 \pm 1455 \text{ a}$	9089 ± 1077 a	8674 ± 1549 a	9337 ± 878 a	11012 ± 924 a	$9021 \pm 1479 \text{ a}$

注(Note): 同列数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column mean significantly different at the 5% level.





Fig. 2 Changes of soil organic carbon contents under different fertilizer treatments from 1990 to 2012

SOC 含量分别提升 26.53%、36.12% 和 28.13%。化 肥配施秸秆处理 (NPKS) 平均值为 13.40 g/kg, 稍高 于初始 SOC 含量 (表 4)。

2.3 长期不同施肥下春玉米产量的 DNDC 模型验证

长期不同施肥处理下春玉米的产量模拟值和实测值比较接近(图3),模型验证结果见表5。除CK外,其他处理的均方根误差RMSE(%)以及平均绝对误差MAE(%)均在20%以内,且各处理间模拟值与实测值之间的相关性均达到极显著水平,说明DNDC模型可以很好地模拟作物产量,能够反映农田作物产量的实际波动趋势。

2.4 长期不同施肥下土壤有机碳的 DNDC 模型验证

长期不同施肥措施下 SOC 含量模拟值与实测值

比较如图 4所示,根据试验的实测值和模拟值计算出 各个处理相对 RMSE (%)、MAE (%)和 R²值(表 6),各处理模拟值和实测值的相对 RMSE 都小于 15%,各处理的 MAE 都在 10% 以内,并且各施肥处 理模拟值与实测值的相关性均达到了显著水平,说 明 DNDC 模型能够很好地模拟不同施肥管理措施下 土壤有机碳的变化趋势。

2.5 长期不同施肥措施下 SOC 的未来气候情景模 拟分析

40年的长期模拟 (图 5) 表明, CK 与 NPK 处理下, 0—20 cm SOC 含量总体均呈下降趋势, 且 CK 处理降幅更显著, 至 2050 年 SOC 含量为 10.2 g/kg, 比试验开始 (1990 年) 下降了 22.55%, 平均每年降低

Table 4 Average soil organic carbon content in different periods under different fertilizer treatments							
处理 Treatment	1990~1994	1995~1999	2000~2004	2005~2009	2010~2012	1990~2012	
СК	$12.5 \pm 0.2 \text{ d}$	13.1 ± 0.6 c	$12.7 \pm 1.4 \text{ b}$	12.6 ± 1.4 c	$10.9 \pm 0.5 \text{ d}$	12.5 ± 1.1 c	
NPK	$12.9\pm0.7~\text{d}$	13.4 ± 0.1 c	$14.3\pm2.0\ b$	$12.7 \pm 1.5 \text{ c}$	$12.4 \pm 1.5 \text{ cd}$	13.2 ± 1.4 c	
NPKM1	13.9 ± 0.8 bc	$15.5\pm0.8\ b$	18.4 ± 2.2 a	19.1 ± 1.6 b	$20.6\pm1.0\;b$	$17.2 \pm 2.7 \text{ b}$	
1.5 (NPK) M1	15.4 ± 1.2 a	18.0 ± 3.0 a	19.4 ± 2.1 a	23.0 ± 2.3 a	$23.8\pm0.6\ a$	19.6 ± 3.6 a	
NPKM2	$13.2 \pm 0.3 \text{ ab}$	$13.6\pm0.4\ b$	13.4 ± 1.3 a	$13.6\pm0.8\ b$	$13.0\pm0.5~b$	$13.4\pm0.7\;b$	
NPKS	$14.8 \pm 0.7 \ cd$	15.9 ± 0.6 c	18.7 ± 2.2 b	20.6 ± 2.3 c	21.6 ± 0.4 c	$18.0 \pm 3.0 \text{ c}$	

表 4 不同时间段不同施肥措施下土壤平均有机碳含量 (g/kg) Average soil organic carbon content in different periods under different fertilizer treatment

注(Note): 同列数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column mean significant difference at the 5% level.





Fig. 3 Comparison between the observed and simulate value of maize yield under different fertilizer treatments

表 5 不同施肥措施下春玉米产量模拟效果

Table 5 Model performance on maize yield under different fertilizer treatments							
处理 Treatment	п	MAE (%)	RMSE (%)	R^2	r		
СК	23	18.92	24.90	0.66	0.81**		
NPK	23	15.12	17.99	0.54	0.74**		
NPKM1	23	12.53	16.91	0.48	0.69**		
1.5 (NPK) M1	23	16.41	19.49	0.40	0.63**		
NPKM2	23	10.48	13.89	0.61	0.78**		
NPKS	23	11.18	14.98	0.38	0.62**		

注 (Note): MAE—平均绝对误差 Mean absolute error; RMSE—相对均方根误差 Root mean square error. 查相关系数检验表, n = 23, $r_{0.05} = 0.41$; $r_{0.01} = 0.52$. **分别表示显著性为 0.05 水平 Mean significant at 0.05 level, respectively.



图 4 不同施肥措施下 SOC 模拟值与实测值的比较



0.37%。NPK 降幅较低,前 35 年相对平稳的下降了 4%,后 25 年降速增大,SOC 含量从 12.5 g/kg 下降 至 11.6 g/kg,下降了 7.76%。NPKS 处理的 SOC 含 量变化趋势在整个模拟期间相对比较稳定,从 1990 年的 12.1 g/kg 增长至 2050 年的 14.4 g/kg,平均每年 递增 0.31%。而三个化肥有机肥配施的处理 NPKM1、 1.5 (NPK) M1 和 NPKM2 在未来 40 年里 (2011~2050) 呈稳定增长态势,以 1.5 (NPK) M1 增势最为显著。 从 2010 年到 2050 年 NPKM1 处理 SOC 含量增加 13.65%,1.5 (NPK) M1 处理下 SOC 增加了 15.74%, NPKM2 处理下 SOC 增加 15.84%。化肥有机肥配施 和秸秆还田可以保持和提高 SOC 含量。

2.6 不同 SOC 值与产量的耦合关系模拟

在不同的氮肥施用基础上,建立 SOC 与作物产 量之间的耦合关系。以试验初始 SOC 含量 13.2 g/kg 和常量施氮水平 (160 kg/hm²) 为基数,依次递增 SOC 值和施氮量,每次模拟代入近 7 年 (2006~2012 年) 的气象数据,将模拟结果中的 7 个年份的产量的加 权平均值作为特定 SOC 和氮肥水平下的产量。

模拟结果表明 (图 6),在相同的施氮水平下,作物产量随着 SOC 的增加而增加,当施氮量分别为 160、200、240、280 和 320 kg/hm² 时,SOC 每增加 1 g/kg 时,作物产量平均增加 44.48、42.28、32.59、 23.21 和 15.95 kg/hm²,即施氮量越低的情况下,SOC

	different fertilizer treatments
Table 6	Model performance on soil organic carbon under
7	麦6 个同施肥处理下土壤有机碳模拟效果

处理 Treatment	n	MAE (%)	RMSE (%)	R^2	r
СК	23	6.58	8.52	0.21	0.46*
NPK	23	7.27	10.05	0.21	0.46*
NPKM1	23	7.93	9.91	0.67	0.82**
1.5 (NPK)M1	23	8.48	11.19	0.65	0.81**
NPKM2	23	9.28	11.04	0.68	0.82**
NPKS	23	6.95	8.28	0.17	0.41*

注(Note): MAE—平均绝对误差 Mean absolute error; RMSE—相对均方根误差 Root mean square error. 查相关系数检验 表, n = 23, $r_{0.05} = 0.41$; $r_{0.01} = 0.52$. * 表示在 0.05 水平上的显著 性; ** 表示在 0.01 水平上的显著性, * and ** mean significant at 0.05 and 0.01, respectively.



图 5 不同施肥措施下 0—20 cm 土层未来土壤 有机碳变化趋势

Fig. 5 The predicted variation trend of soil organic carbon content in 0–20 cm soil layer under different fertilizer treatments

对产量的影响越显著,反之,施氮量高的情况下, 产量对 SOC 的敏感度降低。

3 讨论

3.1 长期不同施肥处理对春玉米产量及土壤有机碳的影响

1990~2012年的田间试验表明,23年后不同施 肥处理 SOC 的含量高低顺序:1.5 (NPK) M1 > NPKM2 > NPKM1 > NPKS > NPK > CK。其中 1.5 (NPK) M1、NPKM2、NPKM1和 NPKS 处理土壤有 机碳呈不断上升趋势。施用化肥能够提高作物的生 物量,进而增加了归还土壤的根茬量,使得最初几 年 SOC 含量下降不明显。长期看来,单施化肥 (NPK)



图 6 不同氮肥水平下 0—20 cm 土层有机碳含量与 作物产量的耦合关系

Fig. 6 Coupling relationship between the simulated maize yield and soil organic carbon content in 0–20 cm soil layer under different nitrogen application rates

[注: N160、N200、N240、N280、N320 指氮肥用量 160、200、240、280、320 kg/hm² Mean nitrogen fertilizer rate of 160、200、240、280、320 kg/hm²]

处理最终表现为 SOC 的明显亏缺,不利于 SOC 的保 持。秸秆还田、化肥配施有机肥都可以维持土壤碳 固存。综合各种施肥措施对产量和 SOC 的总体影响 来看,有机无机肥配施可以最大程度地提高产量和 SOC。这与很多研究者在不同区域、不同土壤类型 以及不同土地利用方式下得出的结论一致^[34-36]。NPKM1 处理下的产量在试验开始时低于 NPK 处理,从试验 开始后第8年起效果显著,主要原因可能是有机肥 中可以被植物直接吸收利用的矿质态养分较少,并 且施用有机肥的土壤 C/N 一般较高, 在分解初期为 了满足自身对氮素的需求会从土壤中吸收矿质氮, 造成和植物竞争养分,影响了作物产量[37]。适应高 C/N 比的微生物种群后来逐渐占优势,从而保障了 养分的持续供给。在实际生产过程中,在保证一定 C/N 比的基础上,通过推广秸秆还田技术或者有机 肥配施无机肥的措施,能够稳定提升土壤有机碳含 量,维持土地生产力。

3.2 DNDC 模型的验证

本研究中,实测数据模型模拟值之间的拟合程 度整体表现较好,从验证结果来看模型模拟该地区 土壤有机碳是可行的,但也存在部分年份模拟值与 实测值仍有一定的差异。有些异常年份如 1994 年模 型表现出是低产年,而所有处理的实测产量数据相 对较高,推测可能是由试验站点与替代气象站点的 气象差异导致的。而 1999 年是丰产年,除了 CK 处 理外其他处理的产量均明显升高,推测是由于 CK 处理肥料成为产量的首要限制因子,对其他环境因素(降水、气温等)的敏感性低于肥料所引起。尤其是遇到干旱或者洪涝年份,由于模型内部参数设置的限制,模型可能存在高估或者低估产量的可能,说明模型也存在着不确定性^[30]。而在模拟土壤有机碳方面,由于土壤有机碳在实际土壤中的变化是一个非常缓慢的过程,而实际监测过程中可能会出现因采样点的不均匀、采样人的不确定性以及试验方面的人为误差造成的测量值年际间的大波动(如 2003~2009 年的 NPKM2 处理),实测值比模拟值呈现出更大的波动性,因此,DNDC 模型为客观地反映土壤有机碳的演变规律提供了理论依据。

通过 DNDC 模型模拟结果显示,秸秆还田可以 稳定地维持 SOC 含量,无机肥配施有机肥能够快速 提升 SOC 含量,主要是由于有机肥的施用不仅直接 增加土壤腐殖质的数量,同时加快活性有机质的分 解,促进土壤团聚体的形成,进而加强了对土壤稳 定性有机碳的物理保护。而秸秆还田对 SOC 的保持 在于秸秆残体中的多糖、纤维素和半纤维素等有机 物质有利于促进大粒径团聚体的增加,进而增加了 对土壤碳的保护^[38-41]。

有机无机肥配施的 3 个处理中, SOC 含量均表 现先快速上升后增加趋势逐渐趋于平缓, 年增长率 逐渐递减, Six 等^[42]认为土壤碳储量不可能无限制的 增加, SOC 存在饱和水平; Hutchinson 等^[43]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, SOC 将达到一个新的平衡, 此时有机碳的合成与分 解速度相等, 年增长率表现为零。Sampson 等^[44]通 过收集数据计算得出, 任何农业生态系统在耕作方 式改变后, 前 20 年土壤碳都以稳定的速率积累, 后 20 年的积累速率直线下滑, 最终达到一个碳累积速 率为零的稳态。从目前的模拟来看, 各施肥处理新 的 SOC 平衡点还没有达到, 东北地区 SOC 的平衡点 可能需要更长的时间尺度和更大范围的空间尺度的 试验和模拟来回答。

3.3 土壤有机碳和作物产量之间的耦合关系

作物产量受土壤养分状况、田间管理以及自然 条件等多种因素的综合制约。本研究参考当地农民 习惯施肥量设置 5 个氮肥水平,通过模拟不同氮肥 输入条件下产量对 SOC 含量变化的响应,综合分析 不同氮肥供应梯度下 SOC 与产量的耦合关系。在相 同的施氮水平下,产量随着 SOC 含量的升高呈现持 续增加的趋势,但是在高的 SOC 水平下产量的增幅 大大降低。在施氮量 160~320 kg/hm² 范围内, SOC 每增加1g/kg时,作物产量平均增加32.10 kg/hm², 这与王卫等[45]研究的在高有机质省区有机质增加 1 g/kg 引起的产出增加量 22.2 kg/hm² 的结论相近, 低于邱建军等^[7]研究的 SOC 增加 1 g/kg 时东北地区 玉米产量增加 176 kg/hm² 的结果, 推测是由于上述 研究代表地区黑龙江省齐齐哈尔市的作物平均产量 为 7757 kg/hm²,而本研究中基于模拟的 NPK 处理 1990~2012年的平均产量已达到 8978 kg/hm²,以目 前的田间管理措施为基准,产量已经达到该管理措 施下的相对理想水平,由此导致产量对 SOC 的敏感 度降低的结果。尽管前人在 SOC 与作物产量关系上 做了大量的研究,多数的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要大于 SOC 本身对作物产量的影响,而基于模型研究的优势是 可以假定特定的气候与农田管理措施,使作物产量 的差异单纯地由 SOC 含量差异引起。

4 结论

1) 通过对吉林省公主岭市长期定位试验 23 年的 春玉米产量和 SOC 含量的数据分析,有机无机肥配 施和无机肥配施秸秆还田技术不仅增产效果较好, 同时可以最大程度地提高土壤有机碳含量。

2) 长期定位实测数据验证了 DNDC 模型在研究 区域的适用性,通过平均绝对误差 (MAE)、相对均 方根误差 (RMSE) 和决定系数 (*R*²) 对模型的适用性 进行分析,模型可以用于模拟东北地区黑土 SOC 的 变化趋势。

3) DNDC 模型模拟结果显示,长期不施肥 CK 和单施化肥 NPK 处理导致土壤有机碳降低;长期有 机无机配施或者秸秆还田可以增加 SOC 含量。在施 氮量 160~320 kg/hm² 水平下,作物产量随着土壤有 机碳含量的增加而升高,且在施氮量低的情况下产 量的提升幅度相对高施氮量大。

参考文献:

- Loveland P, Webb J. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review[J]. Soil Tillage Research, 2003, 70: 1–18.
- [2] Tiessen H, Cuevas E, Chacon P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility[J]. Nature, 1994, 371: 783–785.
- Batjes N H. Total carbon and nitrogen in soils of the world[J].
 European Journal of Soil Science, 1996, 47, 151–163.
- [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): 11–17.
 Jin F, Yang H, Zhao Q G. Soil organic carbon and its influencing

- [5] 许咏梅. 长期不同施肥下新疆灰漠土有机碳演变特征及转化机制
 [D]. 北京: 中国农业科学院博士论文, 2014.
 Xu Y M. The evolution characteristics and turnover mechanisms of soil organic carbon under long-term fertilization in grey desert soil in Xinjiang Autonomous Region[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014
- [6] 邱建军, 王立刚, 唐华俊, 等. 东北三省耕地土壤有机碳储量变化的 模拟研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1166–1171.
 Qiu J J, Wang L G, Tang H J, *et al.* Study on the situation of soil carbon organic storage in arable lands in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(8): 1166–1171.
- [7] 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]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 154–161.
- [8] Wang S Q, Zhou C H, Liu J Y, et al. Carbon storage in northeast China as estimated from vegetation and soil inventories[J]. Environmental Pollution, 2002, 116: 157–165.
- [9] 黄耀, 孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势
 [J]. 科学通报, 2006, 51(7): 750–763.
 Huang Y, Sun W J. During the past 20 years, the changes of farmland surface soil organic carbon content in mainland China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(7): 750–763.
- [10] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等. 东北黑土有机碳的分布及其损失量研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 534–538.
 Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, *et al.* Distribution of soil organic carbon and its loss in black soils in northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(3): 534–538.
- [11] Zhang W J, Xu M G, Wang B R, et al. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilization in the upland red soil of southern China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 84: 59–69.
- [12] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期不同施肥对水稻产量和土壤肥力 的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 534–551.
 Zhang G R, Li J M, Xu M G, *et al.* Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(2): 534–551.
- [13] 朱平, 彭畅, 高洪军, 等. 长期培肥对土壤肥力及玉米产量的影响
 [J]. 玉米科学, 2009, 17(6): 105–108, 111.
 Zhu P, Peng C, Gao H J, *et al.* The effects of long-term fertilization on corn yields and soil fertility[J]. Journal of Maize Sciences, 2009, 17(6): 105–108, 111.
- [14] Liu B, Gumpertz M L, Hu S, et al. Long-term effects of organic and synthetic soil fertility amendments on soil microbial communities and the development of southern blight[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(9): 2302–2316.
- [15] 孙宏德, 朱平, 刘淑环, 等. 有机无机肥料对黑土肥力和作物产量影响的监测研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 110–116. Sun H D, Zhu P, Liu S H, *et al.* Organic and inorganic fertilizer effect on black soil fertility and crop yield monitoring research[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(Suppl.): 110–116.

[16] 陈海心, 孙本华, 冯浩, 等. 应用DNDC模型模拟关中地区农田长期 施肥条件下土壤碳含量及作物产量[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9): 1782–1790.

Chen H X, Sun B H, Feng H, *et al.* Simulation of soil carbon contents and crop yields in long-term fertilized cropland in Guanzhong Area using DNDC Model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(9): 1782–1790.

- [17] Lu F, Wang X, Han B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland[J]. Global Change Biology, 2009, 15(2): 281–305.
- [18] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的 影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 619–623.
 Lao X R, Sun W H, Wang Z, *et al.* Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4): 619–623.
- [19] Lykov A. The effect of the organic matter of edmo podzolic soil on the yields of field crops[J]. Problemy Zemledeliya Referentivnyi Zhurnal Seriya, 1978, 5, 195–202.
- [20] 孟凡乔, 吴文良, 辛德惠. 高产农田土壤有机质、养分的变化规律 与作物产量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 370–374. Meng F Q, Wu W L, Xin D H. Changes of soil organic matter and nutrients and their relationship with crop yield in high yield farmland[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 370–374.
- [21] 徐明岗,梁国庆,张夫道.中国土壤肥力演变[M].北京:中国农业 科学技术出版社,2006.

Xu M G, Liang G Q, Zhang F D. Evolution of soil fertility in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006.

- [22] Pan G X, Smith P, Pan W N. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2009,129: 344–348.
- [23] 包刚, 覃志豪, 周义, 等. 气候变化对中国农业生产影响的模拟评价 进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2): 303–307.
 Bao G, Qin Z H, Zhou Y, *et al.* Advances of evaluation of climate change impact on crop yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(2): 303–307.
- [24] Zhang Y, Wang H, Liu S, et al. Identifying critical nitrogen application rate for maize yield and nitrate leaching in a Haplic Luvisol soil using the DNDC model[J]. Science of The Total Environment, 2015, 514: 388–398.
- [25] Pathak H, Li C, Wassmann R. Greenhouse gas emissions from Indian rice fields: calibration and upscaling using the DNDC model[J]. Biogeosciences, 2005, 2(2): 113–123.
- [26] 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): 153–225.
- [27] Li C, 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): 45–60.
- [28] Tang H, Qiu J, Van Ranst E, *et al.* Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model[J]. Geoderma, 2006, 134(1): 200–206.

- [29] 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碱排措施研究[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 mitigation N₂O emissions from spring maize fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 75-86.
- [30] Yu C, Li C, Xin Q, et al. Dynamic assessment of the impact of drought on agricultural yield and scale-dependent return periods over large geographic regions[J]. Environmental Modeling & Software, 2014, 62: 454–464.
- [31] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
 Bao S D. The method of analysis for soil agro-chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [32] 张明园, 魏燕华, 孔凡磊, 等. 耕作方式对华北农田土壤有机碳储量 以及温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 203–209. Zhang M Y, Wei Y H, Kong F L, *et al.* Effects of tillage practices on soil carbon storage and greenhouse gas emission of farmland in North China[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 203–209.
- [33] Villalobos F J, Hall A J, Ritchie J T, et al. Oilcrop-sun: A development, growth, and yield model of the sunflower crop[J]. Agronomy Journal, 1996, 88(3): 403–415.
- [34] 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. Apply DNDC model to analysis longterm effect of soil organic carbon content under different fertilization and plough mode[J]. Journal of China Agricultural University, 2004, 9(6): 15–19.

[35] 陈长青, 胡清宇, 孙波, 张佳宝. 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, Sin B, Zhang J B. Simulating trends in soil organic carbon of in calcareous fluvo-aquic soil under long-term fertilization using the DNDC model[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1410–1417.

[36] Mu L, Liang Y, Xue Q, et al. Using the DNDC model to compare soil organic carbon dynamics under different crop rotation and fertilizer strategies[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(1): 265–276.

- [37] 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.
- [38] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1350–1358.
- [39] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 等. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 369–373.
 An T T, Wang J K, Li S Y, *et al.* Effects of manure application on organic carbon in aggregates of black soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 369–373.
- [40] Jastrow J D, Miller R M, Boutton T W. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(3): 801–807.
- [41] 周萍, 宋国菡, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳 积累机制研究Ⅱ. 团聚体内有机碳的化学结合机制[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 263–273.

Zhou P, Song G H, Pan G X, *et al.* SOC enhancement in three major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in south China II. Chemical binding and protection in micro-aggregate size fractions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 263–273.

- [42] Six J, Connant R T, Paul E A, Pausian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241, 155–176.
- [43] Hutchinson J J, Campbell C A, Desjardins R L. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142, 288–302.
- [44] Sampson R N, Scholes R J. Additional human-induced activities[A]. Watson RT. Special report on land-use, land-use change and forestry[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 183–281.
- [45] 王卫, 李秀彬. 中国耕地有机质含量变化对土地生产力影响的定量研究[J]. 地理科学, 2002, 22(1): 24–28.
 Wang W, Li X B. Study on the marginal productivity of cultivated land with change of soil organic matter in China[J]. Scientia Geographical Sinica, 2002, 22(1): 24–28.