植物营养与肥料学报 2010,16(6):1410-1417
Plant Nutrition and Fertilizer Science

长期施肥下石灰性潮土有机碳变化的 DNDC 模型预测

陈长青[1,2], 胡清宇[2], 孙 波[1*], 张佳宝[1]
(1 中国科学院南京土壤研究所,江苏南京 210008; 2 南京农业大学应用生态研究所,江苏南京 210095)

摘要: 为探讨长期不同施肥条件下土壤有机碳的变化规律及 DNDC 模型的应用,利用封丘石灰性潮土不同施肥措施下的长期定位试验数据,选取 CK、NPK、1/2NPK+1/2OM、OM 4 个处理,分析了 15 年来作物产量及土壤有机碳(SOC)的变化特征,并用 DNDC 模型预测了试验地近 100 年(2000～2099)的 SOC 变化趋势。结果表明,各施肥处理的多年产量平均值和对照处理差异显著; 施用化肥(NPK 和 1/2NPK+1/2OM)处理和有机肥(OM)处理间也有显著差异; 产量最高为 NPK 处理,达 10811 kg/ha,CK 处理最低,但 1/2NPK+1/2OM 处理产量与 NPK 处理无显著性差异。15 年来土壤耕层(0—20cm)有机碳平均值,以 OM 处理最高,达到 7.90 g/kg,显著高于 1/2NPK+1/2OM、NPK 处理; 而 CK 处理仅为 4.15 g/kg。从 15 年来有机碳的变化看出,CK 处理略有下降,NPK 处理较为平稳,而 1/2NPK+1/2OM 和 OM 处理呈现不断上升趋势,OM 处理上升幅度较 1/2NPK+1/2OM 处理大。对试验地 SOC 变化趋势长期(100a)的模拟结果显示,与初始土壤 SOC 含量相比,100a 后不施肥处理(CK)土壤有机碳含量下降了 52%,化肥(NPK)处理土壤 SOC 含量较为稳定,而 1/2NPK+1/2OM 处理和 OM 处理土壤有机碳增加明显,大约25a 后基本上稳定,100a 后分别较 2000 年增加了 24% 和 25%。从实测数据的分析和 DNDC 模型模拟分析可以看出,有机肥和化肥配施能获得较高作物产量,并能有效地增加土壤 SOC 含量,从而提高土壤的可持续利用能力。

关键词: 土壤有机碳; 长期定位试验; 有机肥; DNDC 模型
中图分类号: S158.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2010)06-1410-08

Simulating trends in soil organic carbon of in calcareous fluvo-aquic soil under long-term fertilization using the DNDC model

CHEN Chang-qing[1,2], HU Qing-yu[2], SUN Bo[1*], ZHANG Jia-bao[1]
(*1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China;*
2 Institute of Applied Ecology, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: The objectives of this paper were to study the variation of soil organic carbon and the application of DNDC model under the long-term different fertilization. Based on the data available of pre-set long-term experiment, four treatments (CK、NPK、1/2NPK+1/2OM、OM) were chosen to study the characteristics of crop yield and content of soil organic carbon(SOC) variation. The trend of SOC in Fengqiu was also simulated by DNDC model with a time scale from 2000 to 2099. The results were as follows: there was a significant difference on average production between fertilization treatments and control. Application of chemical fertilizer (NPK、1/2NPK+1/2OM) increased yield compared to single application of manure, with the highest yield was observed for NPK (10811 kg/ha); However, no significant difference between NPK and 1/2NPK+1/2OM, and the lowest occurred in CK was observed. The content of average SOC in OM was the highest (7.90 g/kg), followed by NPK and 1/2NPK+1/2OM. The lowest SOC was found in CK being 4.15 g/kg. With a time frame of 15 years, the content of SOC in CK decreased slightly, kept constant in NPK, while kept increasing in 1/2NPK +1/2OM and OM. The simulated

收稿日期: 2010-01-08　　**接受日期**: 2010-03-30
基金项目: 国家重点基础研究发展计划"973"课题(2005CB12108); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-407)资助。
作者简介: 陈长青(1969—),男,湖北武汉人,副教授,主要从事农田土壤生态与耕作制度研究。E-mail: c7450@263.net
* 通讯作者 E-mail: bsun@issas.ac.cn

results of SOC trend in Fengqiu with a time scale of 100 years showed that the content of SOC under CK decreased by 52% compared to initial content. Application of chemical fertilizer uniquely (NPK) could maintain constant, while it rose significantly under 1/2NPK +1/2OM and OM treatment in the first 25 year, then it kept stable. The content of SOC increased by 24% and 25% compared to that in 2000 year, respectively. It could concluded that combined application of manure and chemical fertilizer could increased yield and SOC content in the soil, hence, improve the sustainable utilization of soils.

Key words: soil organic carbon (SOC); long-term experiment; organic fertilizer; DNDC model

陆地土壤是地球表面最大的碳库,有机碳储量约为 1400～1500 Pg($1Pg = 10^{15}g$),其中农田土壤贮存的碳占陆地土壤碳贮量的 8%～10%[1]。由于土地利用的变化,如自然植被生长的土地被农用后,导致土壤储存的有机碳被氧化并以 CO_2 等的形式释放到大气中去[2-3]。据估算全球因土地利用方式变化损失的有机碳在 41～55 Pg 之间[4-5]。另外,土壤 CO_2 排放与土壤退化、土壤有机质含量减少和土壤质量下降密切相关[3];而植物生物量输入减少和农业管理活动干扰等也加速了土壤有机质减少,导致土壤有机碳降低[7]。土壤的有机碳含量常被认为是评价土壤质量的一个重要指标,是维持农田生态系统高产稳产最基本的条件[6]。对土壤营养元素的循环和农业可持续发展都有重要意义。因此,大量土壤有机碳的损失还造成了土壤的退化和农业可持续性的降低[8]。

土壤有机碳收支取决于土壤碳输入和输出的平衡。施肥可以改善土壤理化性质,保持土壤肥力,如氮肥施用可以改善土壤有机物质,增加土壤中碳的存留时间[9-10];有机肥施用可以改善土壤的物理和生物及化学肥力,改善土壤团聚体结构,提高土壤微生物活性,增加土壤有机碳等[11-13]。我国已对农业土壤有机碳进行了长期研究,但目标是为了提高土壤肥力,大多忽视了对影响土壤有机碳储量的农业管理措施和自然因素的研究。为此,利用长期田间定位试验,对土壤有机碳长期变化规律进行研究,同时结合作物产量变化进行分析,以期找到一种具有较高经济效益和环境效益的施肥方案,为增加土壤碳储量、减少土壤温室气体排放提供借鉴。

如何评估不同农业管理措施对土壤有机碳长期的影响,长期定位试验和农田生态系统模型可以解决这一问题。从目前的研究技术手段上看,一些陆地生态系统模型被成功地应用于长期定位试验观测数据的整合与预测中[14]。迄今,出现了一些比较成熟的模型,如 CENTURY、DNDC 等都大量应用到陆地生态系统和农田生态系统研究中[15-16]。本研究利用 DNDC 模型模拟长期定位试验土壤有机碳的变化特征,验证该模型在该地区应用的可行性;并预测不同施肥措施对土壤有机碳的长期影响,揭示农田碳源汇的特征,为该地区农业土壤培肥,提高土壤质量和粮食安全提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　DNDC 模型简介

Li 等建立的 DNDC 模型[14-15](反硝化分解作用模型)是目前全球最成功的土壤有机碳(SOC)和 N_2O 释放机理模型之一。该模型是反映农业土壤生态系统中碳、氮生物地球化学过程的普适模型,目标是模拟农业生态系统中碳和氮的生物地球化学循环,时间步长以日为单位,是目前国际上最为成功的模拟生物地球化学循环的模型之一[6,16-21]。DNDC 模型由两个部分组成:第一部分包含土壤气候、植物生长和有机质分解 3 个子模型,其作用是根据输入的气象、土壤、植被、土地利用和农田耕作管理数据预测植物-土壤系统中诸环境因子的动态变化;第二部分包含硝化、脱氮和发酵 3 个子模型,这部分的作用是由土壤环境因子来预测微生物参与的化学反应的速率。这些过程描述了土壤有机质的产生、分解和转化,最后给出土壤有机碳各组分动态含量及 CO_2, N_2O, CH_4, NO 和 N_2 等温室气体通量。DNDC 是一点位模型,当模拟任一点生物地球化学过程时,只要根据作物种植情况输入气象和土壤等数据,便可进行 1 年至多年的模拟。

1.2　试验设计

试验地点位于河南省封丘县的中国科学院封丘农业生态国家实验站(35°04′N,113°10′E)。该区域属半干旱半湿润的暖温带季风气候,年均降水量 605 mm,主要集中于 5～9 月。试验始于 1989 年秋季,采用冬小麦—玉米轮作。供试土壤为轻质黄潮土。试验初始时土壤(0—20 cm)基本性状为:有机碳 5.83 g/kg,全氮 0.45 g/kg,全磷 9.51 g/kg,有效磷 1.93 mg/kg,速效钾 78.8 mg/kg,pH 8.65[22]。

试验设置了 7 个平衡施肥和缺素施肥的处理,

本文选择其中的3个等氮处理和1个对照处理：①氮、磷、钾化肥(NPK)，②有机肥(OM)；③有机肥氮和化肥氮各半(1/2NPK+1/2OM)，④不施肥对照(CK)。每处理4次重复。每季作物肥料用量：N 150 kg/hm^2，P_2O_5 75kg/hm^2，K_2O 150 kg/hm^2；有机肥依据其中的氮含量确定用量，每季约为4500 kg/hm^2(干重)，磷、钾不足部分以化肥磷、钾补充。

1.3 基本参数的获取

气象数据：每天的降水与气温数据由封丘农业生态实验站自动气象观测站观测提供；

土壤和产量数据：收集历年发表的文献，获取土壤有机质、养分、质地、pH值和产量等数据；包括1989～2002年数据[23-25]、2003年的数据[26]、2004年数据[27]和2005年数据[28]。

2 结果与分析

2.1 不同施肥措施对作物产量的影响

不同施肥措施对作物产量高低及其稳定性的影响(表1)看出，在多年平均产量(麦+玉米两熟产量)，施肥处理和对照处理以及化肥处理(NPK和1/2NPK+1/2OM)和有机肥处理间差异显著。其中，NPK处理产量最高，达10811 kg/hm^2，而1/2NPK+1/2OM处理为10597 kg/hm^2，二者无显著性差异；CK处理最低，15年的平均产量只有1222 kg/hm^2，说明施用肥料(包括化肥和有机肥)对作物增产效果显著。从多年产量变化趋势可以看出，NPK、1/2NPK+1/2OM处理产量变化趋势几乎一致，单施有机肥产量要低于化肥处理。但到2000年后，施用有机肥处理后效逐渐体现出来，如1998～2001平均产量和2002～2004平均产量三者无显著性差异。OM处理产量逐渐接近NPK和1/2NPK+1/2OM处理产量水平。本试验产量出现波动性(1998～2001产量的标准误较大)主要是受到气候因子的影响，特别是2000年受到气候影响严重，玉米绝收，导致产量降低。从产量稳定性看，1/2NPK+1/2OM处理稳定性最好，其次为NPK处理，CK处理最差。从施肥措施对产量及其稳定性影响来看，最佳施肥措施为1/2NPK+1/2OM和NPK处理。

表1 不同施肥处理下多年平均产量(玉米+小麦)的差异(1990～2004)

Table 1 Changes of the average yield of maize and wheat under different fertilization treatments (1990-2004)

处理 Treatment	产量 Yield(kg/hm^2)					1990～2004 变异系数 CV(%)
	1990～1993	1994～1997	1998～2001	2002～2004	1990～2004	
NPK	10959±308 a	10120±641 a	11048±2408 a	11223±391 a	10811.9±614.6 a	22.0
1/2NPK+1/2OM	10689±222 a	9763±420 a	11076±2369 a	10952±221 a	10597.6±595.5 a	21.8
OM	7456±897 b	7678±790 b	9864±2117 a	10145±329 a	8694.9±667.7 b	29.7
CK	1416±82 c	809±38 c	1532±594 b	1103±38 b	1222.3±163.2 c	51.7

注(Note)：同列数据后不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平，±前和后为平均值和标准误 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level. Values before and after "±" are mean value and standard error, respectively.

2.2 不同施肥措施对土壤有机碳的影响

表2看出，多年土壤有机碳(SOC)平均值，以OM处理最高，显著高于其它处理。CK处理仅为4.15 g/kg，NPK处理为5.43 g/kg，均小于试验初期的5.83g/kg，说明NPK处理虽然取得较高产量，但同时也消耗土壤地力，对土壤培肥贡献不大。而SOC含量的稳定主要是施肥增加了植物总的生物量，间接增加了根系及分泌物和植株凋零物的还田量。1/2NPK+1/2OM处理SOC明显增加，较试验初期增加了0.8g/kg，说明在化肥+有机肥配施下有利于提高土壤SOC，起到培肥地力的作用。OM处理虽然初期产量不及化肥处理，但后期产量和化肥处理无明显差异；OM处理SOC不断上升，较试验初期增加了2.0 g/kg，主要是因其含有较多有机物质和生物活性物质，促进了土壤团粒结构的形成，有利于土壤有机碳的保护，培肥效果明显。CK处理由于有机物质不断分解，而且生物产量较低，归还的作物根茬与残枝落叶等残留较少，远低于当季的消耗，因而SOC明显下降。

从不同时间段SOC变化来看，CK处理变化不大，略有下降，而其他肥料处理，土壤有机碳均表现不同程度的上升，NPK处理上升幅度相对较小，2002～2005年平均有机碳含量为5.88 g/kg，较1990～1993年增加了23%，而1/2NPK+1/2OM和

OM 处理上升趋势明显,且 OM 上升幅度大于 1/2NPK + 1/2OM 处理。2002 ～ 2005 年,OM 处理 SOC 平均含量达到 9.33 g/kg,而 1/2NPK + 1/2OM 处理 SOC 为 7.61 g/kg; 分别较 1990 ～ 1993 年 SOC 增加了 56% 和 41%,可见,长期不同的施肥措施导致土壤有机碳的显著变化。

表 2　不同施肥措施下土壤有机碳含量的差异(1990 ～ 2005)

Table 2　Change of soil organic carbon content under different fertilization treatments (1990 –2005)

处理 Treatment	SOC (g/kg)					1990 ～ 2005 变异系数 CV(%)
	1990 ～ 1993	1994 ～ 1997	1998 ～ 2001	2002 ～ 2005	1990 ～ 2005	
NPK	4.78 ± 0.07 c	5.36 ± 0.05 c	5.72 ± 0.10 c	5.88 ± 0.03 c	7.90 ± 0.331 a	16.78
1/2NPK + 1/2OM	5.38 ± 0.16 b	6.49 ± 0.12 b	7.07 ± 0.15 b	7.61 ± 0.11 b	6.63 ± 0.225 b	13.58
OM	6.00 ± 0.31 a	7.72 ± 0.18 a	8.54 ± 0.17 a	9.33 ± 0.08 a	5.43 ± 0.113 c	8.30
CK	4.11 ± 0.05 d	4.24 ± 0.05 d	4.09 ± 0.06 d	4.15 ± 0.04 d	4.15 ± 0.026 d	2.49

注(Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平, ± 前和后为平均值和标准误 Values followed by different letters in a column are significant at 5% level. Values before and after " ± " are mean value and standard error, respectively. SOC—土壤有机碳 Soil organic carbon.

2.3　模型的验证

DNDC 模型已在世界许多地区得到验证并开展了应用研究[19, 29–32]; 在我国也已有验证和相关方面的应用研究[6, 20–21, 32–33, 48]。为了进一步验证 DNDC 模型的可靠性,利用 DNDC 模拟出的数据结果与长期定位试验的实测结果进行分析比较,来验证 DNDC 模型的符合度。本研究主要采用相对 RMSE(root mean square error) 模型检验方法来评估模拟值与观测值之间的符合程度[34]。RMSE 可用下面的公式求算:

$$RMSE_n = \frac{100}{OBS_i}\sqrt{\sum_1^n (OBS_i - SM_i)^2/n}$$

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,表明模拟值与实际观察值的一致性越好; 模拟值与观察值之间的偏差越小,即模型的模拟结果越准确、可靠。一般来说 RMSE 值小于 10%,表明模拟值与预测值一致性非常好,在 10%～20% 之间为较好,在 20%～30% 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,模拟效果差[35]。

从图 1 可以看出,有机碳实测值均在模型预测线附近(偏移较小),只是 OM 处理预测值均小于实测值(但幅度较小),其他处理均在预测线上下,可以看出模型模拟效果还是较好的。为进一步检验模型的准确性,采用相对 RMSE 和线性回归方法分析模型偏差度。表 3 看出,所有处理的 RMSE 值均小于 10%,且相关性显著,模型拟合的效果较好。因此利用 DNDC 模型可以模拟本地区有机碳在不同施肥处理下的变化情况。

2.4　不同施肥处理土壤有机碳的模型预测

土壤有机质组分转化一般需要几十年,甚至上百年,因此不同施肥措施对土壤有机碳的影响需要进行长时间的预测分析。本研究利用模型模拟时间为 100a(2000 ～2099 年),在模拟过程中假设未来 100 a 还保持目前的耕作管理水平,且当时气候是近 20a 平均气候的重复。取 0—30 cm 土壤层结果进行分析。模型模拟结果(图 2)表明,不施肥(CK) 处理土壤 SOC 含量呈现下降趋势,100a 后土壤有机碳含量较初始土壤有机碳含量下降了 52%; 化肥(NPK)处理土壤有机碳含量较为稳定,主要是因为 NPK 配合施用提高了作物的生物量,进而增加了归还土壤的作物残余物(根茬与残枝落叶等),使土壤中有机碳的剩余量基本等于分解量,表现为 SOC 含量下降不明显; 而 1/2NPK + 1/2OM 和 OM 处理有机碳增加明显,大约 25a 后基本上稳定,100a 后较 2000 年增加了 24% 和 25%。其原因是有机肥的施用促进了土壤中大团聚体内微团聚体的形成,而微团聚体具有碳保护能力,这对土壤有机碳的固定和储存具有重要作用[29–30]。长期有机肥的施用使得更多新添加的颗粒有机质(POM)被新形成的微团聚体固定[38–39],导致有机碳不断上升。Zotarelli 等[40]研究证明,将颗粒有机质(POM)包裹于微团聚体之中是土壤有机碳的主要保护机制之一。土壤微团聚体与大团聚体相比,其周转速率更慢、稳定性更高[41–42],因此土壤有机碳储存向微团聚体的转移有利于土壤碳的长期保存。

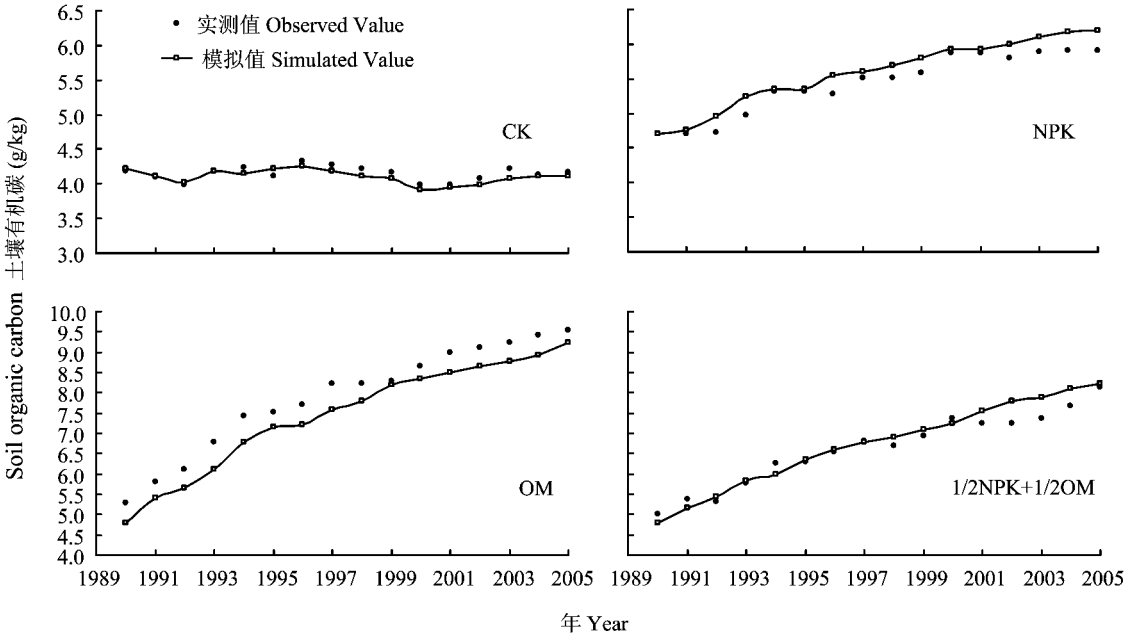

图1 不同施肥处理土壤有机碳的模拟值和实测值

Fig. 1 The simulation and observation values of soil organic carbon under different fertilization treatments

表3 不同施肥处理的模型检验结果

Table 3 The results of model checking under different fertilization treatments

处理 Treatment	n	α	β	R^2	$RMSE_n$ (%)
NPK	16	1.054	-0.140	0.956**	3.4
1/2NPK+1/2OM	16	1.162	-0.972	0.962**	4.0
OM	16	1.025	-0.648	0.989**	5.9
CK	16	0.703	1.191	0.579**	6.1

注(Note): α 为以观测值为自变量,模拟值为因变量进行线性回归后的斜率,越接近1模拟效果越好; β 为截距,越接近0越好; R^2 为相关系数。α is slope of linear regressive, taking simulation values as the dependent variable, and actual values as the independent variables, the more close to 1 as possible; β is the intercept, the more close to 0 as possible; R^2 for the correlation coefficient.

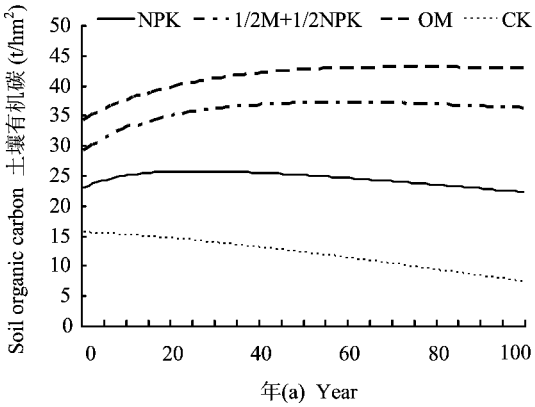

图2 不同施肥处理下0—30 cm土层有机碳含量的变化模拟(2000～2099)

Fig. 2 Simulating the change of soil organic carbon content (0-30 cm) under different fertilization treatments from 2000 to 2099

3 讨论与结论

1) 土壤有机质作为土壤养分循环及肥力供应的核心物质,不仅是一类组成和结构复杂的复合体,而且其碳、氮含量、分子结构、分解速率及转化周期也因气候、植被、人为管理措施及土壤性质等的影响而处于不断的动态变化中[43]。大量研究结果表明,有机残渣(动植物残体等)是团聚体形成的核心碎片,它们为微生物活动提供了碳源,使得微生物产生胶粘物质,导致团聚体的形成[39,41,43]。有机质是土壤团聚体形成的基础,土壤团聚体对有机碳的物理保护也是目前公认的土壤固存有机碳的重要机制之一。因此长期施用有机肥有利于土壤有机碳的提高,使土壤保持较好的生产力水平。本试验表明,15a后有机碳含量高低为OM > 1/2NPK + 1/2OM > NPK > CK,其中CK下降,NPK平稳,而1/2NPK + 1/2OM和OM处理呈现不断上升趋势,OM上升幅度较1/2NPK + 1/2OM大。2005年OM处理有机碳含量达到9.54 g/kg,而1/2NPK + 1/2OM也达到8.12 g/kg,NPK为5.9 g/kg,CK下降到4.17 g/kg。

长期 OM 处理和 1/2NPK + 1/2OM 处理均显著提高了土壤中有机碳含量。

2) 结合产量因素分析,单施有机肥虽然能使有机质含量达到最高,但是最初增产效果不好。主要是有机肥的养分大部分以有机态形式存在而矿质态养分相对较少,有机态分解速度慢,短期内对作物增产效果不明显。土壤中有机碳的分解受土壤微生物的碳氮平衡的影响,土壤的 C/N 在很大程度上影响其分解速率[45]。有机肥施用的有机物质 C/N 一般较高,在分解初期微生物自身繁殖生长表现为缺氮。为了满足自身对氮素的需要,土壤微生物必然会从土壤中吸收矿质氮素,造成微生物和植株竞争氮素养分。化肥与有机肥配施相应补充一定的氮肥,使土壤 C/N 降低,微生物的活性提高,土壤中有足够量的氮供微生物繁殖生长[46],微生物数量和活性的提高有利于有机质的分解[47]。控制 C/N 比在合适的范围,能提高有机质的分解速率,使养分能较快释放出来,既提高了土壤的肥力又能保证理想的收获。氮磷钾配施有机肥,一方面化肥在施肥初期可以满足作物生长发育和微生物的繁殖生长,另一方面有机物在微生物的分解下可以释放有效的养分供作物吸收,还可以改善土壤物理性质、提高土壤肥力。因此,化肥配施有机肥能显著提高有机碳含量,是保持土壤肥力、提高作物产量最有效的方法。氮磷钾平衡施肥能提高作物的生物量,主要是化肥养分多为有效态能被作物迅速吸收,从而保证了作物的养分需求。增加了作物生物量,进而增加了归还土壤的作物残余物(根茬、残枝落叶等),使土壤中有机碳的剩余量基本等于分解量,表现为 SOC 含量变动趋势不明显,但速效化肥容易被雨水带走或挥发,造成环境污染,长期施用还会使土壤出现酸化、盐碱化、土壤板结等问题,不利于土壤的可持续利用。以上说明,无机肥与有机肥配施能显著提高作物产量、增加土壤有机碳和改善土壤肥力,是一种具有较高经济效益和环境效益的施肥方案,单施有机肥从长期效益来看也不失为一种较好的施肥措施。

3) DNDC 模型已在世界很多地方得到验证,并开展了应用研究[14-15,19,29-32]。在我国 DNDC 模型的应用研究大多集中在对温室气体的预测上[20-21,33,48],对土壤有机碳变化也进行了一定研究[6,16]。本研究采用 RMSE 模型检验的方法,对模拟值与观测值之间的符合程度进行了分析,证明 DNDC 模型在模拟旱地土壤有机碳方面结果较准确、可靠,可以用 DNDC 模型模拟试验地所在地区有机碳的变化情况。这与王立刚等[16]在河北省邯郸市曲周县北部的验证结果基本一致。本研究利用 DNDC 模型模拟了不同施肥措施对封丘旱地(0—30 cm 土层)100 a 土壤有机碳的影响,表明,CK 处理在 100 a 后有机碳含量下降 52%; NPK 处理保持较为稳定的趋势; 1/2NPK + 1/2OM 处理和 OM 处理增加明显,25 a 后趋于稳定,100 a 后分别增加 24% 和 25%。说明长期不施肥使旱地土壤有机碳含量迅速降低,土壤肥力显著下降; 长期施用化肥能保证有机碳的稳定,但无益于土壤肥力的提高; 长期施用有机肥或有机肥与化肥配施对保持和提高土壤 SOC 含量意义重大,模拟结果为封丘地区旱地土壤培肥提供了科学的依据。

参 考 文 献:

[1] 林而达,李玉娥,郭李萍,等. 中国农业土壤固氮潜力与气候变化[M]. 北京: 科学出版社,2005. 57.
Lin E D, Li Y E, Guo L P *et al*. Nitrogen-fixing potential and climate change of China's agriculture [M]. Beijing: Science Press, 2005. 57.

[2] 杨景成,韩兴国,黄建辉,等. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(8): 1385-1290.
Yang J C, Han X G, Hu J H *et al*. Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(8): 1385-1290.

[3] 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]. Ecol. Environ. Sci., 2004, 13(1): 81-84.

[4] Lal R, Kimble J M, Levine E *et al*. Soils and global change[M]. Boea Raton: CRC Lewis Publisher, 1995. 131-142.

[5] Cole C V. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions[A]. Watson R T, Zinyowera M C, Moss R H (eds.). Climate change 1996-Impacts. Adaptations and mitigation of climate change[C]. London: Cambridge University Press, 1996. 1-27.

[6] 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,2000,20(4): 345-350.
Li C S. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agroecosystem carbon pool in China and the U. S[J]. Quat. Sci., 2000, 20(4): 345-350.

[7] Schlesinger W H. Carbon sequestration in soil[J]. Science, 1999, 284: 2095.

[8] Dalal R C, Chan K Y. Soil organic matter in rained cropping systems of the Australian cereal belt[J]. Aust. J. Soil Res., 2001, 39: 435-464.

[9] Fog K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of

organic matter[J]. Biol. Rev. Camb. Philoso. Soc., 1988, 63: 433-462.

[10] Bryant D M, Holland E A, Sersledt T R *et al*. Analysis of litter decomposition in an alpine tundra[J]. Can. J. Bot., 1998, 76: 1295-1304.

[11] Blake L, Mercik S, Koerschens M *et al*. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments[J]. Nut. Cycl. Agroecosyst., 2000, 56: 263-275.

[12] 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 Biol. Biochem., 2007, 39: 2302-2316.

[13] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报,2006,43(3): 422-429.
Li H X, Yuan Y H, Huang Q R *et al*. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil[J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 43(3): 422-429.

[14] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. Model structure and sensitivity[J]. J. Geophy. Res., 1992, 97 (D9): 9759-9776.

[15] Li C S, Frolking S E, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: II. Model application [J]. J. Geophy. Res., 1992, 97(D9): 9777-9783.

[16] 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]. J. China Agric. Univ., 2004, 9(6): 15-19.

[17] 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 Environ. Sci., 2000, 9(4): 311-315.

[18] 杨学明,张晓平,方华军,等. 用RothC-26.3模型模拟玉米连作下长期施肥对黑土有机碳的影响[J]. 中国农业科学,2003,36(11): 1318-1324.
Yang X M, Zhang X P, Fang H J *et al*. RothC-26.3 Model simulating long-term effects of fertilization on changes of soil organic carbon in continuous cultivation of corn in northeast China[J]. Sci. Agric. Sin., 2003, 36 (11): 1318-1324.

[19] Smith P, Smith J U, Powlson D S *et al*. A comparison of performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments[J]. Geoderma, 1997, 81: 153-225.

[20] 徐文彬,刘维屏,刘广深. 应用DNDC模型分析施肥和翻耕方式变化对旱田土壤N_2O释放的潜在影响[J]. 应用生态学报,2001,12 (6): 917-922.
Xu X B, Liu W P, Liu G S. Potential effect of fertilizing and tilling on N_2O emission from upland soils analyzed by DNDC model [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2001, 12(6): 917-922.

[21] 王效科,欧阳志云,苗鸿. DNDC模型在长江三角洲农田生态系统的CH_4和N_2O排放量估算中的应用[J]. 环境科学,2001,22(3): 15-18.
Wang X K, Ouyang Z Y, Miao H. Application of DNDC model in estimation of CH_4 and N_2O emissions in agricultural ecosystems in Yangtze River Delta[J]. Chin. J. Environ. Sci., 2001, 22(3): 15-18.

[22] 钦绳武,顾益初,朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报[J]. 土壤学报,1989,35(3): 367-375.
Qin S W, Gu Y C, Zhu Z L. A preliminary report on long-term stationary experiment on fertility evolution of fluvo-aquic soil and the effect of fertilization[J]. Acta Pedol. Sin., 1989, 35(3): 367-375.

[23] 杨林章,孙波. 中国农田生态系统养分循环和平衡及其管理[M]. 北京: 科学出版社. 56-157.
Yang L Z, Sun B. Cycling, balance and management of nutrients in agro-ecosystems in China[M]. Beijing: Science Press, 2008. 156-157.

[24] 尹云锋,蔡祖聪,钦绳武. 长期施肥条件下潮土不同组分有机质的动态研究[J]. 应用生态学报,2005,16(5): 875-878.
Yin Y F, Cai Z C, Qin S W. Dynamics of fluvo-aquic soil organic matter fractions under long-term fertilization[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005,16(5): 875-878.

[25] 孟磊,丁维新,蔡祖聪,等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展,2005,20(6): 687-692.
Meng L, Ding W X, Cai Z C *et al*. Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization [J]. Adv. Earth Sci., 2005, 20(6): 687-692.

[26] 尹云锋,蔡祖聪. 不同施肥措施对潮土有机碳平衡及固碳潜力的影响[J]. 土壤,2006,38(6): 745-749.
Yin Y F, Cai Z C. Effect of fertilization on equilibrium levels of organic carbon and capacities of soil stabilizing organic carbon for fluvo-aquic soil[J]. Soils, 2006, 38(6): 745-749.

[27] 尹云锋,蔡祖聪. 不同类型土壤有机碳分解速率的比较[J]. 应用生态学报,2007,18(10): 2251-2255.
Yin Y F, Cai Z C. Organic carbon decomposition rate in different soil types[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(10): 2251-2255.

[28] 王俊华,尹睿,张华勇,等. 长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响[J]. 生态环境,2007,16(1): 191-196.
Wang J H, Yin R, Zhang H Y *et al*. Changes in soil enzyme activities, microbial biomass, and soil nutrition status in response to fertilization regimes in a long-term field experiment[J]. Ecol. Environ., 2007, 16(1): 191-196.

[29] Li C, Frolking S, Crocker G J. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model[J]. Geoderma, 1997, 81: 45-60.

[30] Tonitto C, David M B, Drinkwater L E *et al*. Application of the DNDC model to tile-drained illinois agroecosystems: model calibration, validation, and uncertainty analysis [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2007, 78: 51-63.

[31] David M B, Del Grosso S J, Hu X *et al*. Modeling denitrification in atile-drained, corn and soybean agroecosystem of Illinois, USA[J]. Biogeochemistry, 2009, 93: 7-30.

[32] 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 K, Peng Z H, Zhang X D *et al*. Biogeochemical model DNDC and its application[J]. Chin. J. Soil Sci., 2007, 38(6): 1208-1212.

[33] 张黎明,于东升,史学正,等. 基于不同土壤数据单元法的 DNDC 模型对太湖地区水稻土 CH_4 排放模拟研究[J]. 环境科学,2009,30(8): 2185-2192.
Zhang L M, Yu D S, Shi X Z *et al*. Simulation of methane emissions from rice fields in the Taihu Lake Region, China by using different unit of soil database with the DNDC model[J]. Environ. Sci., 2009, 30(8): 2185-2192.

[34] 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: 153-225.

[35] Villalobos F J, Hall A J, Ritchie J T *et al*. Oilcrop-Sun: A development, growth, and yield model of the sunflower crop[J]. Agron. J., 1996, 88: 403-415.

[36] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates [J]. Eur. J. Soil Sci., 2000, 51: 595-605.

[37] Denef K, Zotarelli L, Boddey R M *et al*. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols[J]. Soil Biol. Biochem., 2007, 39: 1165-1172.

[38] Denef K, Six J, Paustian K *et al*. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles[J]. Soil Biol. Biochem., 2001, 33: 2145-2153.

[39] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1999, 63: 1350-1358.

[40] Zotarelli L, Alves B J R, Urquiaga S *et al*. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols[J]. Soil Till. Res., 2007, 95: 196-206.

[41] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 801-807.

[42] Balesdent J, Chenu C, Balabane M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage[J]. Soil Till. Res., 2000, 53: 215-230.

[43] Oades J M. The retention of organic matter in soils[J]. Biogeochemistry, 1988, 5: 35-70.

[44] Golchin A, Oades J M, Kjemstad J O *et al*. Soil structure and carbon cycling[J]. Aust. J. Soil Res., 1994, 32: 1043-1068.

[45] Moorhead D L, Reynolds J F. A general model of litter decomposition in the northern Chihuahuan desert[J]. Ecol. Model., 1991, 56: 197-219.

[46] 李忠佩,张桃林,陈碧云,等. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析[J]. 土壤学报,2003,40(3): 344-352.
Li Z P, Zhang T L, Chen B Y *et al*. Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China[J]. Acta Pedol. Sin., 2003, 40(3): 344-352.

[47] 齐雁冰,黄标,顾志权,等. 长江三角洲典型区农田土壤碳氮比值的演变趋势及其环境意义[J]. 矿物岩石地球化学通报,2008,27(1): 50-56.
Qi Y B, Huang B, Gu Z Q *et al*. Spatial and temporal variation of C/N ratios of agricultural soils in typical area of Yangtze Delta region and its environmental significance[J]. Bull. Mineral. Petrol. Geochem., 2008, 27(1): 50-56.

[48] 王小国,朱波,高美荣,等. 川中丘陵区桤柏混交林地土壤 CO_2 释放与 Forest-DNDC 模型模拟[J]. 北京林业大学学报,2008,30(2): 27-32.
Wang X G, Zhu B, Gao M R *et al*. Soil CO_2 efflux and simulation of Forest-DNDC model in the mixed plantation of alder and cypress in hilly areas of the central Sichuan Basin[J]. J. Beijing For. Univ., 2008, 30(2): 27-32.