

高产粮区农业生态系统土壤碳氮循环的模拟研究 ——以河北省曲周县为例

王立刚 邱建军

(中国农业科学院 农业自然资源与农业区划研究所,北京 100081)

摘要 以高产粮区河北省曲周县为例,运用生物地球化学循环模型—DNDC模型,在实测田间试验数据进行模型验证的基础上,对该地区农业生态系统土壤碳氮平衡进行了模拟研究。结果表明:1998年曲周县47 821 hm²农业耕地土壤的总有机碳储量为 $C 742.94 \times 10^6$ kg,平均每公顷耕地土壤有机碳(SOC)储量为 $C 15 536.05$ kg。1998年耕地土壤有机碳为正平衡,1990年为负平衡,2年SOC显著差异的主要原因在于秸秆还田比例的多少。1998年曲周县农业土壤氮库表现为盈余。土壤有机碳的长期模拟动态表明与当前管理相比,增加有机肥和秸秆还田比例、采用免耕均可有效的增加土壤有机碳的积累。

关键词 高产粮区;土壤碳氮循环;DNDC模型

中图分类号 S 181

文章编号 1007-4333(2003)S0-0031-05

文献标识码 A

Study on the simulation of soil carbon and nitrogen cycle in agro-ecosystem in high yields area ——A case study of Quzhou county Hebei province

Wang ligang, Qiu jianjun

(Institute of Natural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract As a typical example of high grain production region, the carbon and nitrogen cyclings of agro-ecosystem were studied with DNDC (DeNitrification-DeComposition) model in Quzhou county of Hebei province. The results showed that the total organic carbon storage was 7.43×10^8 kg in 47 821 hm² farm land of Quzhou county. The average SOC (soil organic carbon) storage per hectare was 1.55×10^5 kg in 1998. Soil organic carbon was at positive balance in 1998, but at negative balance in 1990 because of reduction of straw addition to the soil in 1990. The soil nitrogen pool was in surplus situation in 1998 in Quzhou county. The long-time dynamic simulation of SOC showed that: SOC can be increased depending on higher manure, higher proportions of straw returning and no tillage comparing with current management.

Key words high yield area; soil carbon-nitrogen cyclings; DNDC model

黄淮海平原地区粮食作物的典型生产模式是冬小麦-夏玉米轮作,一年两熟。在成功实现了盐碱地改造和中低产田改良后,逐渐步入中高产区行列。目前面临在农业结构调整和“粮食安全”形势下如何保持可持续发展的后劲,进一步稳产高产,如何保持土壤的长期肥力成为瓶颈问题。

本研究正是以黄淮海平原地区盐碱地改造的中心发源地曲周为例,利用先进的生物地球化学循环模型—DNDC(反硝化—分解)模型,在中国农业大学曲周实验站长期定位试验验证模型的基础上,以高产农田土壤培肥为目标,研究该地区农业生态系统土壤碳氮平衡规律,及其不同农业管理措施对土壤

碳库的长期影响效应。为该地区乃至整个黄淮海平原农业生态系统土壤培肥提供科学的决策依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地点设在中国农业大学曲周试验站,其地理坐标为36°52'N和115°01'E,试验站海拔高度约为40 m。属暖温带半湿润季风气候区。年平均气温为13.2℃,平均年日照时数为2 332.3 h,年均总降水量为514.3 mm。试验地土壤为盐碱地改良后的潮化褐土。在黄淮海平原地区具有一定的代表性。试验分为:

收稿日期:2003-10-14

作者简介:王立刚,博士,主要从事生态模拟研究。

氮(N)磷(P)化肥配比试验:该试验采用 3×3 设计,即氮磷2因素3水平构成9个处理:CK、 N_1 、 N_2 、 P_1 、 P_2 、 N_1P_1 、 N_1P_2 、 N_2P_1 、 N_2P_2 。其中 N_1 、 N_2 分别表示施用N肥 N_{135} 和 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; P_1 、 P_2 表示施用P肥 P_{2O_5} 67.5 、 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从1983年秋开始至今,重复3次,种植方式为冬小麦-夏玉米轮作。

翻免耕试验:该试验采用正交设计,9个处理,3次重复。试验处理如下:

- (1) 翻 N_1P_1 秆 $_1$ (CK); (2) 翻 N_2P_2 秆 $_2$;
- (3) 翻 N_3P_3 秆 $_3$; (4) 翻 N_1P_2 秆 $_3$; (5) 翻 N_2P_3 秆 $_1$;
- (6) 翻 N_3P_1 秆 $_2$; (7) 免 N_1P_3 秆 $_2$; (8) 免 N_2P_1 秆 $_3$;
- (9) 免 N_3P_2 秆 $_1$ 。

注:秆 $_1$: $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 秆 $_2$: $2\ 250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;
秆 $_3$: $4\ 500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

N_1 : $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; N_2 : $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; N_3 : $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$

P_1 : $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; P_2 : $75.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; P_3 : $150.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

翻:翻耕 免:免耕。

氮肥为尿素(含N46%) 磷肥为重过磷酸钙(含 P_2O_5 46%)

(本试验2000年以前的数据为郝晋珉、牛灵安、魏晓静等研究测定^[4,5])。

1.2 DNDC模型

DNDC(DeNitrification-DeComposition)模型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^[6,7],目标是模拟农业生态系统中碳和氮的生物地球化学循环,能够较好的模拟土壤中碳、氮的循环过程和温室气体 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 等的释放规律。对于DNDC模型的验证,应该是在不同气候、土壤背景和土地利用条件下进行,这样该模型才能更好的适用于当地,输出结果也就更接近于真实值。

DNDC区域模型是由区域性输入数据库来支持,即把点位模型所需要的因地制宜的输入参数由各种原始资料收集后一个GIS数据库。其中,作物种类数据库:曲周地区主要种植的作物有:冬小麦、夏玉米、棉花、谷子、花生、大豆、薯类、蔬菜等,还可以模拟复种,当地主要的复种形式有冬小麦-夏玉米、冬小麦-谷子、冬小麦-豆类、冬小麦-甘薯、冬小麦-棉花以及冬小麦-花生等。数据库中还包括作物的有关生理参数(活动积温、最大叶面积指数等)、以及播种期、收获期和最大产量等种植制度参数;气象数据库:曲周实验站模拟年份的逐日气象资料,包括最

高、最低温度和降雨;土壤数据库:乡级级农业土壤特性本底值数据库(包括容重、土壤质地、初始有机碳含量及PH值的最大最小值)。

区域模型以每一个土地类型为最小运行单位,所有土地利用类型(与各自面积的乘积)的某一指标总和为该指标的值,总和为整个区域的结果。每一土地利用类型以土壤有机质最高、最低本地值分别运行模型2次,取平均值。

2 结果与分析

2.1 模型的验证与敏感性分析

DNDC模型已在世界各地得到验证并开展了相应的研究^[8,9]。中国已有部分研究者从土壤有机碳氮动态和温室气体排放等方面对该模型进行了验证^[1~3]。DNDC模型的功能之一就是能够模拟农业生态系统土壤有机碳的动态变化。Li等用DNDC模型模拟英国洛桑试验站冬小麦地近150年土壤有机碳的变化,模拟结果与长期实际测定值之间具有较强的一致性^[8]。我们利用中国农业大学曲周试验站2个长期定位试验土壤有机碳含量的变化来验证DNDC模型。对于模拟的每一个处理结果都通过田间观测结果与模拟结果的一个相关系数 r 与均差 M 来表示:

$$M = (\text{模拟值}_i - \text{实测值}_i) / n$$

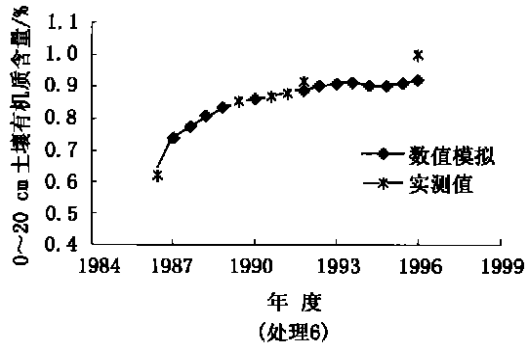
式中: i 为SOC测定的每一年, n 为SOC测定的总年数。对每1次模拟提供模拟的土壤有机碳与田间观测结果。

2个定位试验的每个处理都和DNDC模型的模拟进行了比较验证,结果与实际测定值之间有比较好的吻合。这里仅用试验中的一个处理进行说明。

氮磷化肥配施有利于土壤有机质含量的增加,这主要是因为增施化肥,增加了作物的生物量,进而增加了归还土壤的残余物,使土壤中剩余物量大于分解量,表现为SOC含量的增加。DNDC模型模拟结果来看,从试验开始到1990年增加的较快,而1990年以后,都呈现缓慢的增长态势。处理6(N_1P_1)模拟值与实测值之间 $r = 0.9727$, $M = -0.015\%$,模拟值与实测值之间表现出较强的一致性(图1)。

翻免耕试验处理3由于每年 $4\ 500 \text{ kg} / \text{hm}^2$ 秸秆还田配合氮磷化肥的使用,归还土壤有机碳量大于土壤有机碳分解量,使得有机质含量在不断增加。DNDC模型模拟值与实测值比较(图1) $r = 0.98$, M

- 0.024%, 模型模拟值能够反映实际土壤有机质



年际变化情况。

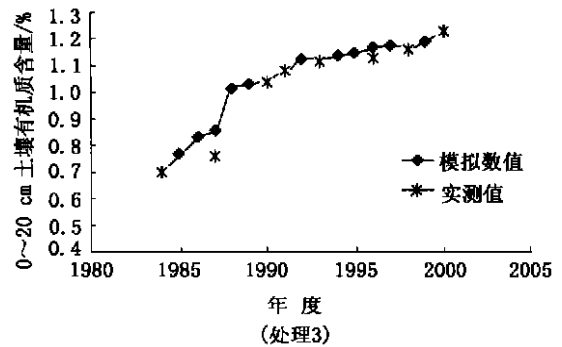


图1 土壤有机质含量与DNDC模型模拟值的比较

Fig.1 Comparison of simulated value on the dynamic soil organic matter with the observed field

2.2 耕地土壤碳储量及其平衡状况

DNDC模型模拟表明1998年曲周县47 821 hm²农业耕地总有机碳储量为C 742.94 ×10⁶ kg(土壤本底有机碳含量最高和最低值2个方案结果的平均值),平均每公顷耕地土壤有机碳(SOC)储量为C 15 536.05 kg,低于我国平均耕地土壤有机碳(SOC)储量C 40 990 kg^[1]。

所谓土壤有机碳平衡(dSOC)是指土壤有机碳收入和支出的抵消情况,即生长季末(年末)SOC储量和生长季初(年初)SOC储量的比较,正平衡表示收入大于支出,反之则入不付出。DNDC模型主要考虑的土壤有机碳收入项包括作物残茬和秸秆还田、人畜粪便及有机肥,支出项主要包括土壤呼吸、碳淋溶和甲烷释放。由图2可见,1998年曲周县为正平衡。碳淋溶和甲烷释放的量都比较少。

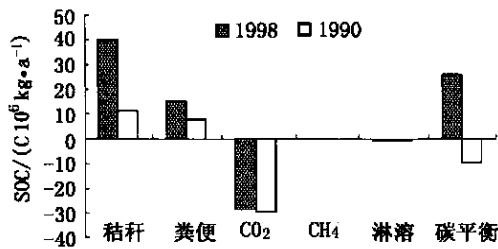


图2 曲周县农业耕地土壤有机碳(SOC)平衡状况

Fig.2 The status of soil organic carbon balance in the cropland in Quzhou county in 1998

由图2可见,1990年曲周县农业土壤有机碳储量变化为负值,证明当时该地区有机碳丢失,处于负平衡。1998年该地区农业土壤有机碳变化(dSOC)达到26.40 ×10⁶ kgC,由1990年的碳亏缺转变到了碳盈余。2年该地区dSOC的差异主要表现在:

1) 秸秆还田的比例,这是碳平衡差异的重要所

在。1990年当地农民生活不是十分富裕,尤其是燃料比较缺乏,大量的秸秆甚至根茬都作为燃料烧掉,秸秆还田比例只有15%左右,致使土地补充碳抵不上因土壤呼吸而散失的碳量,碳储量逐渐减少。近年来随着农业科技的发展和农民对养地重要性的重新认识,加大了秸秆还田比例,平均在30%以上,个别地方(如王庄)秸秆还田率几乎达到100%。使土地丢失的碳得到了大量的补充。

2) 加大了肥料等物质投入。氮肥从1990年N 200 kg ·hm⁻²增加到了1998年的N 275 kg ·hm⁻²,增加了生物产量,加大了有机肥和畜禽粪便的使用。

3) 农业结构的调整。包括大农业的调整和种植业内部的调整,主要是加大了养殖业的比例和豆科等养地作物的种植面积。曲周县近年来由于重视农业结构调整和种地养地相结合,加大了秸秆还田比例和畜禽粪便的投入,因而增加了土壤的碳储量。

2.3 农业生态系统土壤氮平衡

土壤氮平衡,是指土壤氮素收入和支出的抵消情况,正平衡表示氮素收入大于支出,氮素有盈余,反之则氮素亏缺。DNDC模型考虑土壤氮素收入项包括土壤有机质矿化、化肥、作物固氮和大气沉降;支出包括作物吸收、淋溶及释放NH₃、N₂、NO、N₂O等。

模型模拟结果由图3可见,1998年曲周县农业土壤氮库表现为盈余。主要是由于化肥态氮的大量使用,从80年代以来,化肥使用量逐渐增加,到1998年曲周地区农用化肥纯氮为19 941 t,平均每公顷施纯氮为416 kg。从中还可看出以NH₃形式丢失了大量的氮素,另外,化肥的大量使用易造成地下水的污染和温室气体(N₂O)的大量排放,因此,要“因地制宜”以产定肥,精确化肥的用量。

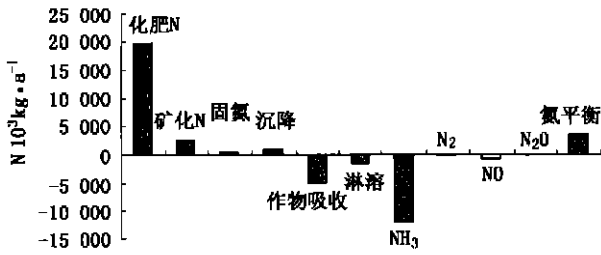


图3 曲周县耕地土壤氮平衡状况(1998年)
Fig. 3 The status of nitrogen balance in the cropland in Quzhou county in 1998

2.4 土壤有机碳的长期反应

农业生态系统土壤有机碳的平衡是一个渐变的过程,易丢失,而不易增加。因此,有必要研究土壤有机碳在不同管理措施和种植方式下的长期反应。以曲周县土壤条件和气候为基础来说明,模型模拟时间为185年,185年的气候是10年气候的重复。图4是不同农作措施对土壤有机碳含量的影响,最明显的长期动态是当前管理和改进措施达到碳平衡所需时间大约为200年左右,而施用有机肥和秸秆还田50%的措施则需要更长的时间,受初始SOC含量的影响较大。与当前管理相比,增加有机肥和秸秆还田比例、采用免耕(秸秆还田率以30%计)均可有效的增加土壤有机碳的积累。而这些措施在技术上并不是非常困难,现在主要是让农民充分认识到这些措施,并持之以恒地实施。

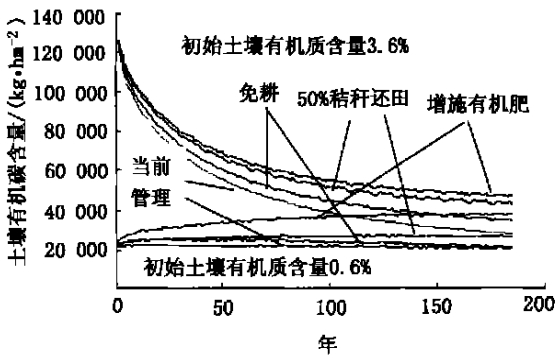


图4 不同农作管理措施对土壤有机碳的长期影响
Fig. 4 Long term effects on the accumulation of soil organic carbon by different cultivation managements

作物不同种植方式对土壤有机碳的平衡有着深刻的影响(图5)。连作玉米有最高的土壤有机碳平衡值,连作小麦则有较低的SOC平衡值,小麦、玉米轮作和小麦、大豆轮作都为二者土壤有机碳贮量的中间水平。这主要是由于剩余物产量的不同所造成的,而要使土壤有机碳增加的很明显,就需要持续的

把有机肥和残余物的碳归还到土壤中。

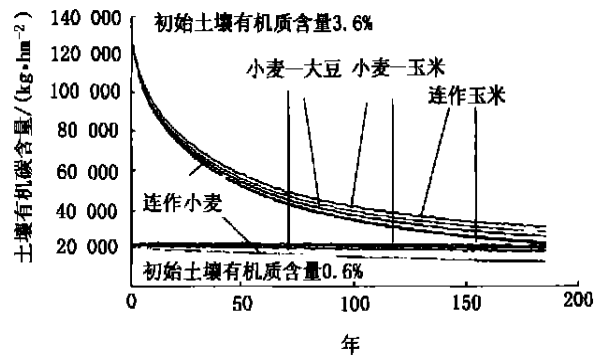


图5 不同种植方式对土壤有机碳的长期反应
Fig. 5 Long term effects on the accumulation of soil organic carbon by different planting

3 结论与讨论

以高产粮区河北省曲周县为例,运用生物地球化学循环模型—DNDC模型,在实测田间试验数据验证的基础上,对该地区农业生态系统土壤碳氮平衡进行了模拟研究。结果表明:1998年曲周县47 821 hm²农业耕地土壤总有机碳储量为C 742.94 × 10⁶ kg,平均每公顷耕地土壤有机碳(SOC)储量为C 15 536.05 kg。1998年耕地土壤有机碳为正平衡,1990年为负平衡,2年SOC显著差异的主要原因在于秸秆还田的比例。1998年曲周县农业土壤氮库表现为盈余,主要是由于化肥态氮的大量使用所造成的。土壤有机碳的长期模拟动态表明当前管理和改进措施达到碳平衡所需要的时间大约为200年左右,而施用有机肥和秸秆还田50%的措施则需要更长的时间,且受初始SOC含量的影响较大。与当前管理相比,增加有机肥和秸秆还田比例、采用免耕均可有效的增加土壤有机碳的积累。不同种植方式下连作玉米有最高的土壤有机碳平衡值,连作小麦则较低,小麦、玉米轮作和小麦、大豆轮作为中间水平。

本研究是运用DNDC模型,以高产粮区曲周县为例进行的初步研究。研究结果仅反应曲周土壤碳氮平衡规律的基本概况,若更深入的研究,应在充分验证模型的基础上,对秸秆还田比例、有机肥施用量等敏感性参数进一步核实后,对土壤碳氮循环规律温室气体排放及其全球变化的响应做系统的研究。

参 考 文 献

[1] 邱建军,唐华俊,等. 区域农业生态系统土壤碳氮平衡

- 研究——以国家尺度为例[A]. 唐华俊主编. 农业资源利用与区域可持续发展研究[C]. 北京: 中国人口出版社, 2002. 298 ~ 316
- [2] 王效科, 欧阳志云, 等. DNDC 模型在长江三角洲农田生态系统的 CH_4 和 N_2O 排放量的应用[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 15 ~ 19
- [3] 徐文彬, Li C S, 等. 区域农业土壤 N_2O 释放研究——以贵州省为例[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(5): 450 ~ 456
- [4] 郝晋珉, 牛灵安. 盐渍土持续利用过程中土壤有机质演化阶段特征[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(1): 55 ~ 57
- [5] 郝晋珉, 牛灵安, 等. 盐渍化土壤的系统培肥过程[A]. 盐渍化改造区农业综合持续发展[C]. 1995. 201 ~ 205
- [6] Li C S, Steve Frolking. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2 model applications[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(9): 9777 ~ 9783
- [7] Li C S, Frolking S. Frolking TAA model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I model structure and sensitivity[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(9): 9759 ~ 9776
- [8] Li C S, Graham J, Crocker, et al. Simulating trends in soil organic carbon in Long-term experiments using the DNDC model[J]. Geoderma, 1997, 81: 45 ~ 60
- [9] Li C S, Rober Harriss. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils[J]. Global biogeochemical cycles, 1994, 8(3): 237 ~ 254

www.cnki.net