

辽宁省农田土壤碳库分布及变化的模拟分析

韩 冰^{1,2}, 王效科^{1*}, 欧阳志云¹, 曹志强², 邹德乙²

(1. 中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085; 2. 沈阳农业大学, 沈阳 110161)

摘要: 中国作为世界上一个重要的农业大国, 农业土壤对全球大气中 CO_2 浓度的影响正在引起人们的普遍关注。研究以辽宁省为对象, 采用针对农业土壤碳库和痕量气体排放估算建立的反硝化分解(DNDC)模型, 在建立有关辽宁省气候、农业土壤和农业生产的分县数据库基础上, 估算了辽宁省农田土壤碳库储量, 为 118.55TgC, 并发现辽宁省农田土壤碳量有较明显的地区差异, 东北地区较高, 西南地区较低。经过一年的耕种后, 农田土壤碳的变化量也有较明显的地区差异, 东北地区减少幅度较大, 西南地区相对变化不大或有所增加。还发现无论何种施肥方式, 辽宁省农田土壤碳的变化都存在地区差异。且施用有机肥有利于农田土壤碳的积累。在输入的土壤性质数据中, 有机质数据的详细程度对 DNDC 模型模拟结果的精确度影响较大。

关键词: 辽宁省; 生物地球化学模型; 农田土壤; 碳库

A simulation analysis of distribution and change of agricultural soil carbon pool in Liaoning Province

HAN Bing^{1,2}, WANG Xiao-Ke¹, OUYANG Zhi-Yun¹, CAO Zhi-Qiang², ZOU De-Yi²

(1. DSE, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085; 2. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1321~1327.

Abstract: The contribution of China's agricultural practice to atmospheric CO_2 has been paid a great attention because China has a long history of agriculture to support one-fifth of global population. Some authors have thought agricultural soils could sequester a considerable carbon to slow the rise of atmospheric CO_2 . In fact, this sequestering potential depend on initial soil content, climate and cultivation. The long-term experiments in North America have proved that arable lands have been changing from a C source to sink by conservation management, such as reduced- and no-till practice, rotation, and introducing cover crops. Herein, by applying a process-oriented model DNDC (Denitrification and decomposition) to assess soil carbon pool and its changes in Liaoning Province.

DNDC model has been developed to predict soil carbon and nitrogen biogeochemistry, including soil carbon pool and some trace gas emissions. DNDC was constructed with two components that reflect the driving force which control geochemical and/or soil biochemical processes related to trace gas emissions.

基金项目: 国家重点基础发展规划资助项目(2002CB412500); 中国科学院知识创新重大工程资助项目(KZCX1-SW-01-17)

收稿日期: 2002-11-06; **修订日期:** 2003-05-10

作者简介: 韩冰(1978~), 女, 黑龙江人, 主要从事陆地生态系统 C、N 循环研究。E-mail: hanb666@yahoo.com.cn

* **通讯作者** Author for correspondence, E-mail: wangxk@mail.rcees.ac.cn

感谢 New Hampshire 大学的 Pro. Changsheng Li 提供最新版本的 DNDC 模型

Foundation item: the Notional Key Basic Research Project(2002CB412500) and the Project of Knowledge Innovation of CAS(KZCX1-SW-01-17)

Received date: 2002-11-06; **Accepted date:** 2003-05-10

Biography: HAN Bing PhD., candidate, main research field: C and N cycling of terrestrial ecosystem.

The first component, consisting of soil conditions, crop growth and decomposition sub- models, predicts soil temperature, moisture, pH, redox potential (Eh) and substrate concentration profiles based on ecological drivers (e. g. , climate, soil, vegetation and anthropogenic activity). The second component, consisting of the nitrification, denitrification and fermentation sub-models, predicts NO, N₂O, CH₄ and NH₃ fluxes based on soil environmental variables. Classical laws of physics, chemistry or biology, or empirical equations generated by previous field studies were used to parameterize each specific reaction in this model. The entire model forms a bridge between basic ecological drivers and trace gas emissions.

DNDC model has been tested against a number of field measurements worldwide. Most of the tests showed that DNDC was able to capture general patterns and magnitudes of agricultural soil carbon content measured in fields. In order to apply DNDC to estimate agricultural soil carbon pool and its changes in Liaoning Province, we validated DNDC against the data monitored with two treatments (applying N-fertilizer and manure, respectively) at long-term experiment station of Shenyang Agricultural University. The results showed that DNDC model was suitable for application to estimate the agricultural soil carbon pool in Liaoning Province.

The results showed that the agricultural soil carbon content of Liaoning Province was 118.55 (50.8~186.3) TgC under the climatic, soil and farming management conditions in 1990. The regional variation of SOC was significant. SOC content was higher in northeastern parts of Liaoning Province while lower content occurred in southwestern parts. The total changes of agricultural soil carbon content of Liaoning Province were -0.995(-3.17~1.18)TgC per year with regional variation. The amount of the reduction of SOC in northeastern parts of Liaoning Province was relatively large. In the southwestern parts, little reduction or increase of SOC was occurred. We also found that regional variation in change of SOC was occurred under applying N-fertilizer or manure. Applying manure was beneficial to accumulation of agricultural soil carbon. By compared different input data of soil properties, it is showed the degree of details of soil organic matter had great influence on the accuracy of DNDC modeled SOC.

Key words: Liaoning Province; biogeochemical model; agricultural soil; carbon pool

文章编号:1000-0933(2003)07-1321-07 中图分类号:S154.1 文献标识码:A

大气 CO₂(主要的温室效应气体)浓度急剧升高与全球气候变暖是当今最令人关心的环境问题之一。工业自身减低 CO₂ 排放是一个很复杂的问题,会影响国计民生。在这种情况下,北美土壤科学家提出农业土壤作为大气 CO₂ 库的构想。在调查和分析两国土壤和农业现状后,他们提出只要农民持续采用他们称之为的有利土壤固定 CO₂ 的农业措施,美加两国土壤将在今后 20a 内贮存 11 亿 t 有机碳素^[1],这一数量相当于两国在京都会议上承诺降低工业释放量的 15%左右^[2]。另一方面,增加土壤有机碳含量也是提高土壤肥力、增加农业资源持续利用的主要途径之一。中国作为世界上一个重要的农业大国,农业土壤对全球大气中 CO₂ 浓度的影响正在引起人们的普遍关注。

辽宁省地处我国温带、暖温带气候带,农业历史比较悠久。在长期的农业耕作下,土壤有机质的变化如何,不但对农业生产非常重要,而且对阐明区域土壤固碳潜力非常有意义。辽宁省典型农田的土壤有机碳的测定已经有几十年的历史了,积累了一些数据,这为估计辽宁省农田土壤碳库和制定增加土壤碳库的措施提供了基础数据。本研究在分析总结现有的测定结果的基础上,验证了估算区域农田土壤碳库和痕量气体排放量的生物地球化学模型 DNDC,进一步利用 DNDC 模型估算了辽宁省农田土壤碳库,并着重分析其分布格局及其变化。

1 研究方法

1.1 DNDC模型数据

Li 等在研究农业土壤中碳氮地球化学循环规律的基础上,开发了 DNDC (Denitrification and

Decomposition)模型^[3~5]。该模型既可以对某一实验点的农田土壤有机碳量及变化进行模拟,也可以估算中国和美国或某一区域的农田土壤碳储量^[6],其模型的输入项目如表 1。

表 1 DNDC 模型的输入项目
Table 1 Input items of DNDC model

因子 Factors	项目 Properties
气候 Climate	日最高最低气温和日降水量 Max and min temperature and precipitation each day
土壤 Soil	容重 Bulk density、质地和粘粒含量 Texture、有机质 Content of organic matter 和 pH
耕作措施 Measure	土地利用类型 Types of land use、作物产量 Crop yield、作物物候(播种期和收获期)Time of semination and harvest、肥料使用量 Amount of fertilizers(无机肥 Inorganic fertilizer 和有机肥 Organic fertilizer, 无机肥 Inorganic fertilizer 分为:硝酸盐 Nitrate、铵盐 Ammonium、碳酸氢铵 Ammonium acid carbonate、尿素 Urea 和氨水 Aqua ammonia; 有机肥区别不同的碳氮比 Organic fertilizer divided into different C/N)、施肥时间 Fertilizing time、耕地 Tillage(时间 Time 和方式 Method)、灌溉 Irrigation(时间 Time、水量 Amount 和 pH)、淹水 Flooding(始末时间 Time)和锄草 Weed(时间 Time 和方式 Method)

DNDC 模型能够估算有机质分解和根呼吸所产生的 CO₂,硝化和反硝化过程中产生的 N₂O,模拟土壤碳库和氮库的动态行为^[3~5]。由 4 个子模型组成:土壤气候子模型利用每日气象数据(温度、降水)预测每小时的土壤温度和湿度剖面、土壤水流和植物吸水。作物子模型模拟各种作物从播种到收获的生长状况,预测籽实、秸秆和根系的生物量和氮含量。作物的生长受根区土壤氮和水分的限制。水分蒸腾是由作物生长和作物水分利用效率决定的。分解子模型有 4 个土壤碳库,枯落物、易分解及难分解腐殖质和微生物生物量等。每一碳库有一个固定的分解速率和碳氮比。分解速率受土壤质地、土壤温度和湿度以及氮素供给控制。分解过程中矿质化的氮素以 NH₄⁺形式进入无机氮库,进一步硝化成 NO₃⁻(有 NO 和 N₂O 形式的氮损失),或被植物吸收、淋溶、转化成挥发性 NH₃,或被粘粒矿物吸附。土壤中可溶性碳为硝化和反硝化作用提供能源,它的水平与凋落物、可溶性腐殖质和死微生物分解释放的碳有关。作物生长和分解子模型的时间尺度为日。硝化反硝化子模型以小时为时间尺度。降水、淹水和低温为主要激发因子。这些激发因子都会造成土壤水分增加及土壤有效氧对反硝化反应的启动,NO₃⁻和可溶性碳库的初值由分解子模型提供。对于反硝化还原过程(NO₃⁻→NO₂⁻→N₂O→N₂)的每一步的速率,是由可溶性碳、土壤温度、PH、氨基质的有效性和反硝化菌数量决定的。雨后土壤的干燥,每一模拟层的反硝化能力随土壤湿度减少而降低。

1.2 模型验证

模拟结果的可信度,只有与实测结果数据进行比较才能确定。尽管 DNDC 模型对于农田土壤有机碳 SOC(soil organic carbon)的模拟估算,已经先后与美国、德国和英国的野外实验数据进行比较,表明该模型具有较高的可信度^[7]。但如果将该模型应用于估算中国甚至辽宁省农田土壤碳库时,有必要与辽宁省现有野外实测数据进行比较。

在辽宁省,本研究选取的是沈阳农业大学肥料长期定位实验站所提供的实测数据(1979~1993 年)。该实验地位于北纬 41.46 度,东经 123.26 度,土壤为棕壤,为辽宁省非常典型的土壤类型,质地为中壤质,pH 为 6.5,1979 年春土壤有机质为 1.59%。从 1979 年到 1981 年种植作物按玉米-大豆-高粱轮作,自 1982 年以后按玉米-大豆-玉米轮作。玉米、高粱所施氮肥为尿素 N 120kg/hm²,大豆所施氮肥为硫酸铵 N 22.5kg/hm²,施用有机肥全部为猪厩肥(C/N=12)C 1300.66kg/hm²,采取传统的耕作与栽培措施。每年秋收后,进行取样测定。

对于该实验站土壤有机碳的模拟,根据模型程序提示逐一输入各种参数,其中气候数据来源于《中国地面气象记录月报》^[8],土壤性质数据和耕作措施来自实验地点的记录。运行模型,得出沈阳农业大学肥料长期定位实验站土壤有机碳 SOC(0~20cm)各年(1979~1993 年)的模拟结果。

如果实测结果和 DNDC 模型模拟的结果能够较好的符合,DNDC 模型就可以被用来估算辽宁省农田土壤碳库储量

万方数据

1.3 区域模拟

对于区域的模拟,问题就变得复杂多了。这里采用地理信息系统技术,按照 DNDC 模型输入格式的要求,通过建立以县为单元的数据库文件,作为 DNDC 模型的输入。该数据库包括了辽宁省 74 个县的编码、地理位置、土壤有机质、粘粒含量和 pH 最大值和最小值、气象数据、各种土地利用类型面积等。其中县界来自国际地球科学信息网络(CEISIN, <http://www.ceision.org>)。气象资料来自 CO₂ 信息分析中心(CDIAC, <ftp://cdiac.esd.ornl.gov>)。有关土壤性质的资料,来源于《辽宁省第二次土壤普查数据集》。有关耕作制度资料来自《中国农业物候图集》^[9]和有关农业栽培指导手册。土地利用类型是影响模拟估算结果的重要因素。不同土地利用类型(包括作物类型和轮作制度)所采用的耕作措施是不一样的。这里将中国的农业土地利用类型分为 18 个类型:小麦玉米轮作、冬小麦、春小麦、玉米、单季稻、双季稻、油菜、土豆、高粱、秋作物类、小麦水稻轮作、大豆、棉花、甘蔗、甜菜、绿肥、草地和空地。以县为单元的各土地利用类型的面积数据来自农业部有关统计资料。

1.3.1 现状评价 对于辽宁省农田土壤碳库的估算,气温和降水资料取 1990 年的,各种作物播种面积和化肥使用量也取 1990 年的。假定作物残茬有 20% 留在农田中,农家肥使用量取按家畜饲养量计算的排泄物量的 20%。耕作方式按现有一般耕作制度。根据各县土壤有机质含量的最大值和最小值,分别用 DNDC 模型估算了全省各县各土地利用类型的农田土壤碳库的范围,得出平均值。

1.3.2 土壤基础输入数据对计算结构的影响分析 为了分析土壤各种性质(pH、有机质、质地)对土壤碳库估算结果的影响,对土壤性质数据库文件进行了修改(根据《辽宁省第二次土壤普查数据集》)。考虑了 3 种情况:按 pH 的各种级次分级、按有机质的各种级次分级和按质地的各种级次分级。将各种分级按每一级次分别进行模拟,将结果分类相加,得到在各种分级下辽宁省 SOC 及其变化量的最大值和最小值。

1.3.3 情景分析 为了分析施肥对全省农田土壤碳库分布格局的影响,考虑了以下二种情况(Scenario):单施化肥 N 120kg/hm² 和单施有机肥 C 1300.657kg/hm²。将模拟结果通过 Arcview 制图,得出不同的施肥情况对农田土壤碳库影响的区域差异。

2 结果与讨论

2.1 DNDC 模型的验证

从图 1 可以看出,对于沈阳农业大学肥料长期定位实验站,无论是氮肥区还是有机肥区,实测结果和 DNDC 模型模拟结果符合都很好。其中有机肥区有两点有些偏离模拟结果,这可能是由取样和实验误差所带来的结果,但从变化趋势看,模拟结果和实测结果是相符的。这说明 DNDC 模型可以用来估算辽宁省农田土壤碳库储量。

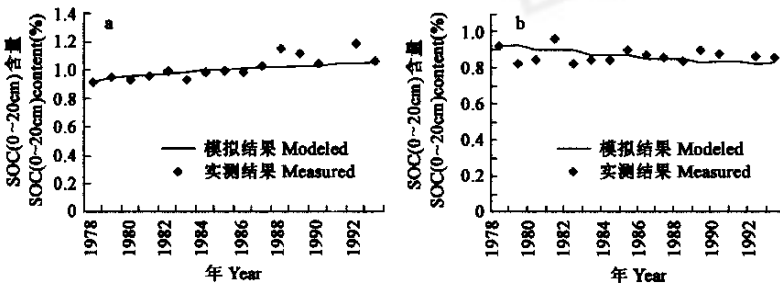


图 1 沈阳有机肥区(a)和氮肥区(b)模拟结果与实测结果比较

Fig. 1 Comparison of SOC content between DNDC model estimation and field measurement in manure field(a) and N-fertilizer field(b) of Shenyang Agriculture University

从图 1 的有机肥区和氮肥区的 SOC 各年变化情况可以看出:长期施用有机肥使土壤有机碳含量持续增加,1993 年 SOC 含量比 1978 年增加了 16.09%;而长期单施化学氮肥使土壤有机碳含量有所下降,1993 年 SOC 含量比 1978 年下降了 6.74%。因此,施用有机肥有利于土壤有机碳的积累,而单施化学氮肥将促进土壤有机质的分解。

2.2 辽宁省农田土壤碳库分布格局

根据 DNDC 模型估计,辽宁省农田土壤碳库总量为 118.55(50.8~186.3)TgC。从分布上看,有较明显的地区差异(如图 2)。在东北部土壤碳含量较高,其中以桓仁县最高,达 C 81.6t/hm²;在西南部较低,以义县最低,为 C 23.7t/hm²。在总体趋势上,从西南向东北逐渐增加。这较符合实际,在辽宁省的东北地区,与吉林省相近的几个县市的土壤类型为肥沃的黑土,其土壤有机质的含量很高,也是主要的粮食产区之一。而辽西地区大多分布着褐土类型,此类土壤贫瘠,有机质含量低,作物类型主要为小杂粮、小豆等。

经过 1a 的耕种,农田土壤碳总的变化量为 -0.995(-3.17~1.18)TgC,变化率为 -0.839%。有的县市 SOC 增加,有的县市减少,但是从全省总的来看还是在减少。从分布上看,农田土壤碳的变化量也存在较明显的地区差异(如图 3)。东北部肥沃的土壤有机质减少很多,而西部贫瘠的土壤相对变化不大或有所增加。这是因为:土壤在含碳量很低的情况下,经过耕种,会获得少量的碳;而含碳量很高的土壤经过耕种后至少要失去 20% 的碳^[10]。另一方面,东北部为主要的粮食产区之一,有机质含量高,集约耕种,人为活动频繁,土壤有机质分解加快;而西南部人为活动较少,土壤有机质分解减慢。

根据 DNDC 模型模拟的辽宁省 74 个县的农田土壤碳库储量与经过一年耕种的变化量的结果,可以得出如下关系(图 4),在土壤碳含量很高的情况下,经过一年耕种后,SOC 损失量也很大,随着土壤碳含量的下降,损失量也在下降,当 SOC 含量达到某一低值后,土壤碳含量变化很小,或有所增加。这验证了上述结论。

表 2 辽宁省各种分级下的 SOC 及其变化量的比较
Table 2 Comparision of SOC and its change under different classifications in Liaoning Province

分级	SOC-	SOC-	SOC	SOC
Method of	max	min	change-max	change-min
grade	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/hm ²)	(kg/hm ²)
按 pH	6.13	1.82	251.66	-1266.85
按有机质	4.58	2.89	-84.73	-673.01
Organic matter				
按质地	6.29	1.87	239.98	-1328.81
Texture				
平均 Average	6.13	1.82	251.99	-1267.40

2.3 土壤性质的分级对辽宁省土壤碳估算的影响

根据土壤性质在各种分级下利用 DNDC 模型模拟的辽宁省农田土壤碳及其变化量的结果如表 2 所示。其中“平均”指土壤性质没有进行分级改变时的模拟

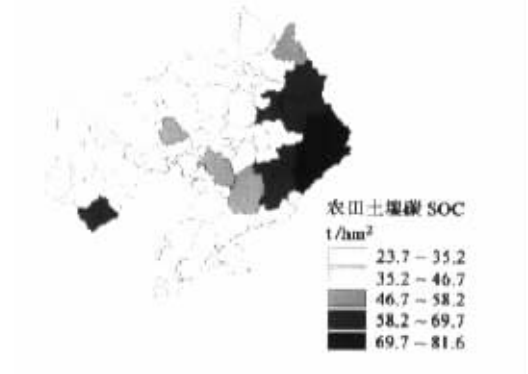


图 2 辽宁省农田土壤碳分布
Fig. 2 Distribution of carbon in agricultural soils in Liaoning Province

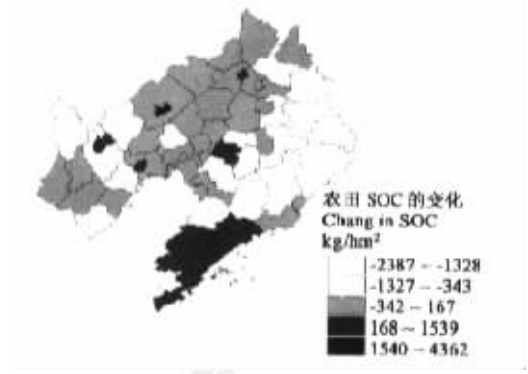


图 3 辽宁省农田土壤碳一年间变化量分布
Fig. 3 Distribution of change in SOC in Liaoning Province for one year

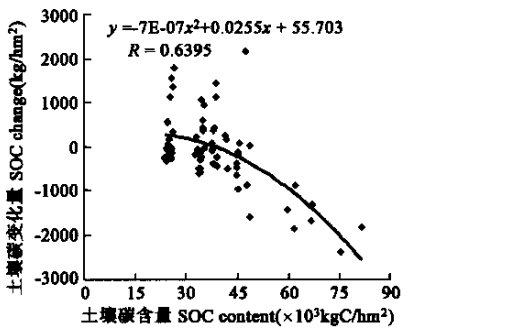


图 4 土壤碳含量与经过一年耕种的变化量的关系
Fig. 4 Relationship between SOC content and its change after one vear cultivation

结果,以用来做比较参照。可以看出,按 pH 和质地分级得出的结果与“平均”值相差不大,且值的范围较大,较粗略。只有按有机质分级得出的结果与“平均”值相差较大,值的范围缩小,相对较精确。这说明有机质数据的详细程度对模型模拟结果影响较大,在用 DNDC 模型模拟时要使有机质的输入数据尽量详细。这为以后类似的研究工作提供参考。

2.4 不同施肥对辽宁省农田土壤碳分布格局的影响

利用 DNDC 模型估算在单施氮肥和单施有机肥两种情况下所得到的辽宁省农田土壤碳经过一年耕种后的变化量。单施氮肥不利于土壤碳库的积累,经过一年的耕种后,全省碳总量减少了 1.992TgC;单施有机肥,从全省来看,使土壤碳总量有了明显的提高,全省增加了 0.015TgC。这与沈阳农业大学肥料长期定位实验站的实测数据结论相符。这说明,农业在追求产量的同时,要注意对土壤碳素的补给,这既有利于土壤肥力的提高,增加土壤可持续利用的潜力,又有利于碳素从大气向土壤的转移,使环境问题有所缓解。

在土壤碳变化的分布上(如图 5),两种施肥方式有一个共同点:在土壤碳含量高的东北部县市,经过一年的耕种后,土壤碳减少的幅度最大;而在西南部的县市,土壤碳变化幅度不大。

土壤有机碳下降幅度为 $-2474\sim-834\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 的县市,在单施氮肥时有 13 个,占全省的 17.6%,而单施有机肥时,减少为 8 个县市,占全省的 10.8%。土壤有机碳上升幅度为 $808\sim5722\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ 的县市,在单施氮肥时为 0 个,单施有机肥时增加为 11 个,占全省的 14.9%。有些县市在单施氮肥时土壤碳减少,在施用有机肥时,土壤碳转变为增加,如庄河县、辽阳县、抚顺市等 40 个,占全省的 54.1%。总体来说,施用有机肥有利于土壤碳的积累。

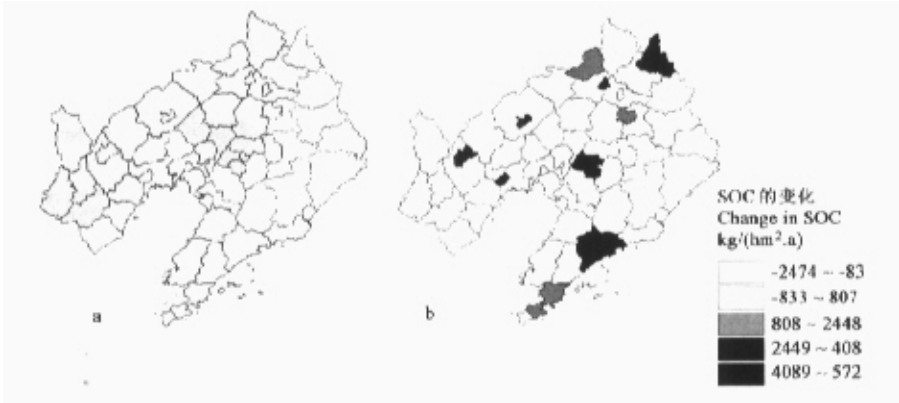


图 5 不同施肥处理后辽宁省农田土壤碳变化量分布图:(a)单施氮肥,(b)单施有机肥

Fig. 5 Distribution of change in carbon of agriculture soil in Liaoning province under different conditions: (a) applying N-fertilizer, (b) applying manure

3 结论

- (1)通过与实际田间测定结果比较说明,DNDC 模型能够较好地反映辽宁省农田土壤碳库实际,可以用来估算辽宁省农田土壤碳库储量。
- (2)目前辽宁省农田土壤碳库总量为 118.55TgC,地区差异明显,西南地区较低,东北地区较高。农田土壤碳的变化量也存在较明显的地区差异,东北地区减少幅度较大,西南地区相对变化不大或有所增加。
- (3)在输入的土壤性质数据中,有机质数据的详细程度对 DNDC 模型模拟结果的精确度影响较大。
- (4)利用 DNDC 模型发现,无论何种施肥方式,辽宁省农田土壤碳的变化都存在地区差异。且施用有机肥有利于农田土壤碳的积累。

References:

[1] Bruce 万方数据, Haites E, et al. Carbon sequestration in soils. *J. Soil Water Conservation*, 1999, **54**: 382 ~389.

[2] Yang X M. Carbon sequestration in farming land soils. *Soil and environmental sciences*,2000,**9**(4):311~315.

[3] Li C, Frolking S and Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events, 1. Model structure and sensitivity. *J. Geophys. Res.* , 1992,**97**:9759~9776.

[4] Li C, Frolking S and Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events, 2. Model applications. *J. Geophys. Res.* ,1992,**97**:9777~9783.

[5] Li C,Narayanan V and Harris R C. Model estimates of nitrous oxide emissions from agricultural lands in the United States. *Global Biogeochem. Cycles*,1996,**10**:297~306.

[6] Li C, Zhuang Y and Frolking S. Crop residual management and changing SOC in agricultural soils of china. *Ecol. Appl.* ,2003 (in press).

[7] Li C, Frolking S and Harriss R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochem. Cycles*,1994,**8**(3):237~254.

[8] Data branch of national meteorological center of China. *Chinese weather record monthly report on land*. Beijing: Meteorological Press,1979~1993.

[9] Zhang F C,Wang D H,Qiu B J. *Chinese agricultural time atlas*. Beijing:Science Press,1987.

[10] Mann L. K. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science*,1986,**142**(5):279~288.

[11] Wang X K,Zhang Y H,Li C S. The distribution pattern of N₂O emission from agricultural soil in China. *Acta Ecological Sinica*,2001,**21**(8):1225~1232.

[12] Wang X K,Ouyang Z Y,Miao H. Application of DNDC model in estimation of CH₄ and N₂O emissions in agricultural ecosystems in Yangtze River delta. *Environmental Science*,2001,**22**(3):15~19.

[13] Wang X K,Li C S. N₂O emission from agricultural soil in China. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2000,**20**(4):483~488.

参考文献:

[2] 杨学明. 利用农业土壤固定有机碳. *土壤与环境*,2000,**9**(4):311~315.

[8] 北京气象中心资料室. 中国地面气象记录月报. 北京:气象出版社,1979~1993.

[9] 张福春,王德辉,丘宝剑. 中国农业物候图集. 北京:科学出版社,1987.

[11] 王效科,庄亚辉,李长生. 中国农田土壤 N₂O 排放通量分布格局研究. *生态学报*,2001,**21**(8):1225~1232.

[12] 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 CH₄ 和 N₂O 排放量估算中的应用. *环境科学*, 2001,**22**(3):15~19.

[13] 王效科,李长生. 中国农业土壤 N₂O 排放量估算. *环境科学学报*,2000,**20**(4):483~488.