

农田土壤有机碳动态模拟模型的建立

黄耀^{1,2}, 刘世梁¹, 沈其荣¹, 宗良纲¹

(¹南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; ²中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 假定施入土壤的有机物料由易分解与难分解两组分组成, 这部分外源有机碳与土壤原有有机碳的分解遵循一级动力学反应, 相应的一级动力学速率常数受土壤环境影响函数的修正, 导出各组分有机碳分解模型的微分形式: $dC_i/dt = K_i \times f_T \times f_W \times f_S \times C_i$ ($i = 1, 2, S$)。式中 C_i 为第 i 种有机碳组分 t 时刻的数量, $i = 1, 2, S$ 分别表示外源有机碳中易分解与难分解组分以及土壤原有有机碳组分, K_i 为相应的一级动力学速率常数, f_T 、 f_W 及 f_S 分别为土壤温度、水分及质地对有机碳分解的影响函数, 它们通过对不同有机物料在实验室控制条件下的培养测定结果得以确定。由有机碳分解模型的微分形式导出相应的积分形式: $C_{it} = C_{i0} \times \text{EXP}(K_i \times f_T \times f_W \times f_S \times t)$ 。运用非线性技术, 求得一级动力学参数 K_1 、 K_2 及 K_S 分别为 0.025 、 0.080×10^{-2} 和 $0.065 \times 10^{-3} (\text{d}^{-1})$, 小麦秸秆、小麦根系、水稻秸秆及水稻根系的易分解比例分别为 0.50 、 0.25 、 0.40 和 0.20 , 该数值与物料的碳氮比及木质素含量有关。

关键词: 农田土壤; 有机碳分解; 模拟; 模型

中图分类号: S-03; S153.621 文献标识码: A 文章编号: 0578-1752(2001)05-0532-05

Model Establishment for Simulating Soil Organic Carbon Dynamics

HUANG Yao^{1,2}, LIU Shi-liang¹, SHEN Qi-rong¹, ZONG Liang-gang¹

(¹ College of Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095;

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: Assuming that decomposition of organic matter in soils follows the first-order kinetics reaction, a computer model was developed to simulate soil organic matter dynamics. Organic matter in soils is divided into two parts including additional organic carbon input from crop residues or other sources and soil intrinsic carbon. The additional organic carbon was assumed to consist of two components, readily decomposable and resistant to decomposition. The model was represented by a differential equation of $dC_i/dt = K_i \times f_T \times f_W \times f_S \times C_i$ ($i = 1, 2, S$) and an integral equation of $C_{it} = C_{i0} \times \text{EXP}(K_i \times f_T \times f_W \times f_S \times t)$. Effect of soil temperature, soil water status and soil texture on the decomposition was functioned by the f_T , f_W and f_S , respectively. Data from laboratory incubation experiments were used to determine the first-order decay rate K_i and the fraction of readily decomposable carbon of crop residues by employing a nonlinear method. The values of K for the components of readily decomposable and resistant to decomposition and the soil intrinsic carbon were evaluated to be 0.025 , 0.080×10^{-2} and $0.065 \times 10^{-3} \text{d}^{-1}$, respectively. The fractions of readily decomposable component from wheat shoots, wheat roots, rice shoots and rice roots were 0.50 , 0.25 , 0.40 and 0.20 , respectively. These values are related to initial carbon-to-nitrogen ratio (C/N) and lignin content of the residue.

Key words: Agricultural soils; Decomposition of soil organic carbon; Simulation; Model

近 20 年来我国农村经济迅猛发展, 在许多经济发达的农村地区, 传统的有机农业模式已被打破, 取

收稿日期: 2000-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(39830220)及中国科学院“百人计划”项目

作者简介: 黄耀(1956-), 男, 江苏张家港人, 教授, 博士生导师, 获美国莱斯大学生态与进化生物学系哲学博士, 中国科学院大气物理所“百人计划”入选者, 主要从事生态系统模型及全球变化方面的教学与研究。Tel: 025-4396406; E-mail: huangy@mail.njau.edu.cn

而代之的是以大量化肥投入为主的石油农业。一方面, 作物秸秆就地焚烧、农村畜禽粪便等直接弃入江湖, 造成农村生态环境恶化。另一方面, 农田有机肥的施用愈来愈少。由于农业的产量过分地依赖于化肥的投入, 又没有保证秸秆等有机物的归还, 导致土壤有机质矿化与积累的不平衡, 支出大于收入, 土壤有机质含量逐年减少。

农田土壤有机质处于动态平衡中, 其含量取决于其年形成量和分解量的相对大小。一方面是外来有机质不断输入土壤, 并经微生物分解、转化形成新的土壤有机质; 另一方面是土壤原有有机质不断地被分解和矿化, 离开土壤。Jenkinson^[1]把由有机质输入、在土壤中的转化和矿化过程所构成的物质流通称作土壤有机质的周转。土壤有机质周转是一个十分复杂的流通和转化动力学过程, 这个过程受土壤温度^[2]、水分^[3]、质地^[4]、有机物料的化学组成^[5]及外源有机质输入^[6]等的影响。由于农田土壤的复杂性, 人们难以对土壤有机质周转过程在各种条件组合下进行试验研究, 因而对农田土壤的管理带有很强的地域性和经验性。因此, 建立一个受土壤条件、气候条件及有机物组成等综合影响的农田土壤有机碳动态模型, 并以此指导农田土壤的管理具有重要的意义。同时, 农田土壤有机碳的周转也是 N、P、S 等营养元素转化的载体。因而农田土壤有机碳动态模型又是 N、P、S 在土壤—作物生态系统中转

化、循环的基本模型。

尽管国际上在土壤有机质动态模拟领域作了大量的卓有成效的工作^[7-9], 但我国在这方面的研究则是刚刚起步。本文以实验室控制条件下的研究结果为基础、计算机模拟技术为手段, 建立农田土壤有机碳动态模型。主要目的是预测农田土壤有机碳含量的变化并据此提出调控措施, 为农田土壤的管理提供科学依据。

1 基本假设与概念性模型

外源有机碳输入是维持和提高农田土壤有机碳含量的主要途径。一般认为, 施入土壤中的有机物料(如作物残茬、秸秆、绿肥、厩肥等)可分为易分解与难分解两组分^[7,9,10]。易分解组分包括糖类、蛋白质、半纤维素等; 难分解组分包括木质素等。易分解组分的半衰期为 2~ 3 个月, 难分解组分的半衰期为 1.5~ 2 年甚至更长^[8,11], 此后部分极难分解的碳进入土壤碳库。这一部分碳及土壤原有有机碳的分解极其缓慢, 半衰期为几十年到几百年^[8,12]。本研究假定外源有机物料易分解与难分解两组分以及土壤原有有机碳的分解遵循一级动力学反应, 相应的一级动力学速率常数 K_1 、 K_2 及 K_s 受土壤环境影响。图 1 为农田土壤有机碳周转的概念性模型, 其中 F 为外源有机物料易分解比例。

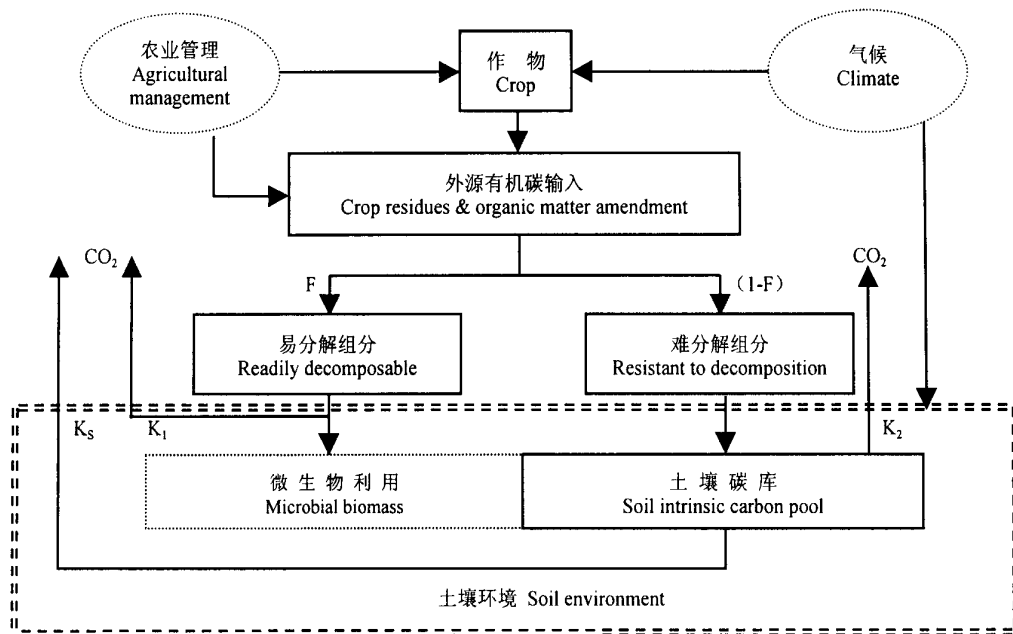


图 1 农田土壤有机碳周转的概念性模型

Fig. 1 Conceptual explanation for modeling soil organic carbon dynamics

2 基本函数

2.1 温度影响函数

为确定有机碳分解与温度条件的数量关系, 设置 5 个温度水平(12、18、24、30、36℃)对小麦秸秆、水稻秸秆和相应的根系分别在 3 个水分条件(20%、30% 和 50%) 下进行为期 90d 的实验室培养测定。结果表明, 在培养前期(0~ 30d) 温度升高明显促进有机碳的分解, 而在后两个月的培养时段内, 温度升高并未明显促进有机碳的分解。我们分别计算了不同培养时段(以一个星期为间隔) 各供试有机物料在 3 种水分条件下分解的温度系数 Q_{10} 。结果表明, 在 90d 的培养时段内, 供试物料分解的温度系数并非一个常数。在培养初期 Q_{10} 较大, 平均值为 2.5 左右, 随培养时间的延长, Q_{10} 逐渐减小, 大约 30d 以后, Q_{10} 接近于常数 1.31 ± 0.04 。这意味着在外源有机物施入土壤的初期, 温度条件对分解速率的影响比较明显, 随着时间的延长, 其影响愈来愈小。利用非线性分析方法, 求得供试物料有机碳分解的温度系数 Q_{10} 与培养时间 $t(d)$ 的数量关系(图 2) 为:

$$Q_{10} = (3.36 + 0.34t)/(1 + 0.29t) \quad (1)$$

$(R^2 = 0.9495^{**}, n = 11)$

参照作者以往的研究^[13], 定义如下温度影响函数:

$$f_T = Q_{10} \frac{T_s - 10}{10} \quad (2)$$

式中, f_T 为温度影响函数, T_s 为土壤温度(℃)。

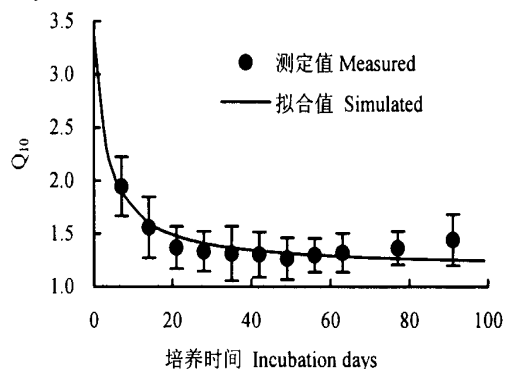


图 2 温度系数随培养时间的变化

Fig. 2 Change of temperature coefficient with incubation time

2.2 水分影响函数

为确定有机碳分解与水分条件的数量关系, 设置 9 个不同水分条件对小麦秸秆(加入量为 10g/kg, 30℃) 进行为期 49d 的实验室培养测定。结果表明, 当水分含量为 35% 左右(- 0.033MPa, 相当于

田间最大持水量) 时, 有机碳分解最快。将各水分条件下的 CO_2-C 测定值除以水分含量为 35% 下的测定值, 可得各水分条件下有机碳的相对分解量, 其值在 0~ 1 之间。利用回归分析, 求得有机碳的相对分解量与水分含量的数量关系(图 3) 为:

$$f_w = 0.49EXP(3.88W - 5.40W^2) \quad (3)$$

$(R^2 = 0.9727^{**}, n = 9)$

式中, f_w 为不同水分条件下有机碳的相对分解量, 定义其为水分影响函数, W 为土壤水分含量。淹水条件下, f_w 取值为 0.65。

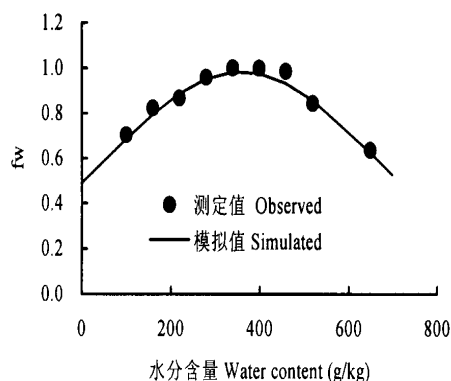


图 3 不同水分含量下有机碳的相对分解量

Fig. 3 Relative amount of organic carbon decomposition under different water content

2.3 土壤质地影响函数

一般而言, 粘土中的空气较之砂土要少, 好气性微生物的活性往往受到抑制。许多实验结果还表明: 土壤粘粒具有保持碳素的能力, 其含量影响外源有机质(有机化合物、植物残体) 及其转化产物的分解速率或稳定性^[14, 15]。培养实验结果表明, 外源有机质在土壤中的分解量随着粘粒含量的增加而减少, 其数量关系(图 4) 为:

$$Y = 287 - 73.7Clay \quad (4)$$

$(R^2 = 0.9223^{**}, n = 6)$

式中, Y 为有机碳分解量(mg C), $Clay$ 表示直径 < 0.005mm 的粘粒含量。上式表明, 当粘粒含量趋于 0 时, 分解速率最快, 分解量为 287mg C。参照水分影响函数的表达, 导出土壤质地影响函数为:

$$f_s = Y/287 = 1 - 0.26Clay \quad (5)$$

式中, f_s 为土壤质地影响函数。当粘粒含量趋于 100%, 即 $Clay$ 趋于 1 时, $f_s = 0.74$ 。

3 模型结构

3.1 微分模型

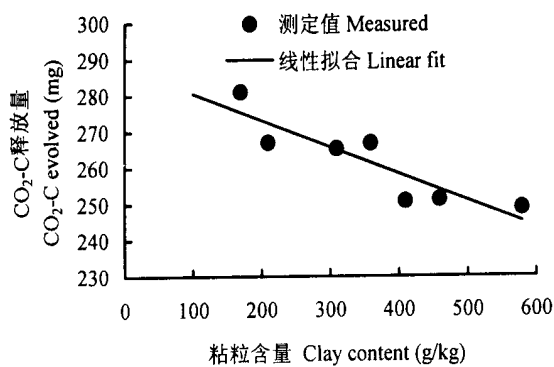


图 4 小麦秸秆在不同粘粒含量土壤中的 CO_2 累积释放量
Fig. 4 Cumulative amount of carbon mineralized from wheat straw in paddy soils with different clay contents

由基本假设及概念性模型(图 1), 导出各有机碳组分分解的一级动力学模型如下:

$$dC_i/dt = K_i \times f_T \times f_w \times f_s \times C_i \quad (i = 1, 2, S) \quad (6)$$

式中 C_i 为第 i 种有机碳组分 t 时刻的数量, $i = 1, 2, S$ 分别表示外源有机碳中易分解与难分解组分以及土壤原有有机碳, K_i 为一级动力学参数。 f_T, f_w, f_s 分别为由方程(2)、(3)、(5)给出的温度影响函数、水分影响函数及土壤质地影响函数。取时间步长(t)为一天, 则 t 天内第 i 种有机碳组分的累积分解量 Y_{it} 为:

$$Y_{it} = \sum K_i \times f_T \times f_w \times f_s \times C_i \quad (i = 1, 2, S) \quad (7)$$

3.2 积分模型

表 农田土壤有机碳分解模型参数

Table Parameters for modeling soil organic carbon decomposition

| 参数 Parameter | 一级动力学常数 First order decay rate (d^{-1}) | | | 易分解比例 Readily decomposable fraction | | | |
|-----------------|---|------------------------|------------------------|--|---------------------|---------------------|--------------------|
| | K_1 | K_2 | K_S | 小麦秸秆 Wheat shoots | 小麦根系 Wheat roots | 水稻秸秆 Rice shoots | 水稻根系 Rice roots |
| 数值 Value | 0.025 | 0.080×10^{-2} | 0.065×10^{-3} | 0.50 | 0.25 | 0.40 | 0.20 |

5 讨论

一般认为, 在不同的温度范围内, 温度变化对土壤有机碳分解的影响是不同的^[2, 17]。然而, 关于温度对土壤有机碳分解的影响随着分解时间的延长而逐步减小则鲜有报道。从土壤微生物营养源(substrate sources)的角度来看, 在有机物料投入土壤的初期, 营养供应充足, 此时营养物质不是限制微生物

对微分模型(6)积分, 容易导出各有机碳组分分解的积分模型:

$$C_{it} = C_{i0} \times \text{EXP}(K_i \times f_T \times f_w \times f_s \times t) \quad (8)$$

式中 C_{it}, C_{i0} 分别为第 i 种有机碳组分 t 时刻的数量及初始数量。同样, 由上式可得 t 时段内第 i 种有机碳组分的累积分解量 Y_{it}' 为:

$$Y_{it}' = C_{i0} - C_{it} = C_{i0} \times [1 - \text{EXP}(K_i \times f_T \times f_w \times f_s \times t)] \quad (9)$$

假定外源有机物料初始数量为 C_0 , 易分解比例为 F , 则易分解组分与难分解组分的初始量分别为:

$$\begin{cases} C_{10} = F \times C_0 \\ C_{20} = (1 - F) \times C_0 \end{cases} \quad (10)$$

4 参数确定

上述土壤有机碳分解模型共有 4 个待定参数, 即一级动力学速率常数 K_1, K_2, K_S 及外源有机物料的易分解比例 F 。根据在不同温度及水分条件下对小麦秸秆、水稻秸秆和相应根系的实验室培养测定结果, 利用有机碳分解的积分模型(方程 8), 运用非线性技术^[16], 确定出参数 K_1, K_2 及 F 。表给出了各参数值, 其中 K_S 的数值参考了张英利的工作^[12]。由方程(6)可知, K_1, K_2 及 K_S 值的基本意义是各相应有机碳组分在砂性土壤($< 0.005\text{mm}$ 的粘粒含量趋于 0, $f_s = 1$)、田间最大持水量($f_w = 1$)及土壤温度为 10°C ($f_T = 1$)时的日相对分解量。

活动的因素, 而其它环境条件(如水热等)的变化则影响着微生物的活动。随着有机物料的逐步降解, 营养源不断减少, 此时营养物的供应是限制微生物活动的关键因素, 因而随着时间的延长, 温度对有机碳分解的影响愈来愈小。

根据 Pinck 等对 12 种一年生植物残体的分解测定, Parton 等^[8]用植物残体的初始木质素含量(L)与氮含量(N)的比值确定该物料的易分解比例

(F_m), 其基本方程为: $F_m = 0.99 - 0.018L/N$ 。然而, 该数量关系并没有在本项研究中得到验证。本研究测定得到的 4 种作物残体(小麦秸秆、小麦根系、水稻秸秆、水稻根系)的 L/N 比值分别为 34.3、30.5、17.8 和 14.8。按 Parton 等给出的数量关系, 这些作物残体的易分解比例依次为 0.37、0.44、0.67 和 0.72。这意味着根系的易分解比例大于相应秸秆的比例, 在同样的环境条件下, 根系的分解速率大于相应秸秆的分解速率, 这有悖于实际情况。对表中所示的易分解比例 (F) 与相应作物残体性质的进一步分析表明, F 值与该物料的 C/N 比及木质素含量(L) 满足如下数学关系: $F = 0.092(C/N)/L - 0.03$ ($r^2 = 0.9901^{**}$, $n = 4$)。该数学关系是否适宜于其它种类的有机物料需作进一步研究。

References:

- [1] Jenkinson D S, Ayanaba A. Decomposition of carbon-14 labeled plant material under tropical conditions [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41: 912- 915.
- [2] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27: 753- 760.
- [3] Huang D M, Zhu P L, Wang Z M. A study and question on the decomposition rate of organic carbon under upland and submerged soil conditions [J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(4): 482- 492. (in Chinese)
黄东迈, 朱培立, 王志明. 旱地和水田有机碳分解速率的探讨与质疑 [J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 482- 492.
- [4] Jenkinson D S. Soil Conditions and Plant Growth [M] (ed. Wild, A). Harlow, Longman. 1988: 564- 607.
- [5] Lin X X, Wen Q X, Xu N. Study on decomposition of plant residues in soils of Guangzhou and Wuxi [J]. Acta Pedologica Sinica, 1985, 22(1): 47- 54. (in Chinese)
林心雄, 文启孝, 徐 宁. 广州和无锡地区土壤中植物残体的分解速率 [J]. 土壤学报, 1985, 22(1): 47- 54.
- [6] Zhu P L, Huang D M, Yu X H, et al. Mineralizing characteristics of ^{14}C -labeled straw and stubble in flooded and dry land soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25(7): 67- 70. (in Chinese)
朱培立, 黄东迈, 余晓鹤, 等. ^{14}C 标记秸秆和根茬在淹水及旱地土壤中的矿化特征 [J]. 土壤通报, 1994, 25(7): 67- 70.
- [7] Van Der Lingden A M A, Van Veen J A, Frissel M J. Modelling soil organic matter levels after long-term applications of crop residues, and farmyard and green manures [J]. Plant and Soil, 1987, 101: 21- 28.
- [8] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51: 1173- 1179.
- [9] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observations and modelling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome world wide [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7: 785- 809.
- [10] Murayama S. Decomposition kinetics of straw saccharides and synthesis of microbial saccharides under field conditions [J]. Journal of Soil Science, 1984, 35: 231- 242.
- [11] Parshotam A, Sagar S, Searle P L, et al. Carbon residence times obtained from labelled ryegrass decomposition in soils under contrasting environmental conditions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 75- 83.
- [12] Zhang Y L. Decomposition equilibrium of organic matter in Lou Soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994, 25(1): 19- 21. (in Chinese)
张英利. 壤土中有机质分解平衡之研究 [J]. 土壤通报, 1994, 25(1): 19- 21.
- [13] Huang Y, Sass R L, Fisher F M. A semi-empirical model of methane emission from flooded rice paddy soils [J]. Global Change Biology, 1998, 4: 247- 268.
- [14] Paul E A, Clark, F E. Soil Microbiology and Biochemistry [M]. New York: Academic Press Inc. 1989: 31- 130.
- [15] Tate R L. Soil Organic Matter: Biological and Ecological Effects [M]. New York: John Wiley & Sons, 1987: 150- 200.
- [16] Wilkinson L. SYSTAT: The System for Statistics [M]. Evanston, IL, Systat Inc. 1989: 313- 323.
- [17] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, 8: 315- 323.