

# 不同施肥措施对潮土有机碳平衡及固碳潜力的影响

尹云峰<sup>1,2</sup>, 蔡祖聪<sup>1\*</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008;

2 福建师范大学地理科学学院亚热带资源与环境省重点实验室, 福州 350007)

**摘要:** 以中国科学院封丘农业生态实验站的长期定位施肥试验为研究平台, 研究不同施肥措施对潮土有机 C 含量的影响, 并利用 Jenny 模型对不同施肥措施下的潮土有机 C 动态进行模拟。结果表明, 施肥措施明显改变了潮土有机 C 含量, 并且有机肥处理的作用效果要明显优于化肥处理。不同施肥措施不仅改变了潮土有机 C 的平衡水平, 也影响了有机 C 的分解速率, NPK、1/2OM 和 OM 施肥处理的有机 C 平衡值分别为 7.19、7.75 和 9.37 g/kg, 而分解速率分别为 0.038、0.113 和 0.145 1/a。在目前施肥模式不变的情况下, 与试验初相比, 达到平衡时 CK 处理的潮土将会损失 C 1478 kg/hm<sup>2</sup>, 而 NPK、1/2OM 和 OM 处理的潮土则会分别增加 C 7376、7790 和 12066 kg/hm<sup>2</sup>。因此, 可以认为施肥处理促进了潮土的 C 固定。

**关键词:** 施肥; 潮土; 有机碳平衡; 固碳潜力

**中图分类号:** S153; S154

农田土壤有机 C 含量的增加不但提高土壤肥力和生产力, 而且增加对大气 CO<sub>2</sub> 的固定。因此, 研究农田土壤的固 C 潜力及其固 C 途径, 对于土壤生产力的可持续性和全球 C 循环都有重要的意义<sup>[1-4]</sup>。但是, 农业管理措施不可能无限地促进土壤 C 含量的增加, 当 C 输入等于 C 输出时, 土壤 C 含量将达到一个新的动态平衡, 而这个新平衡值的大小可能取决于农业管理措施和土壤类型以及气候条件的综合效应<sup>[5-8]</sup>。土壤有机 C 的平衡研究多利用长期定位试验和模型的模拟来完成<sup>[9-15]</sup>。然而, 长期定位试验虽是研究土壤有机 C 动态的理想手段, 但长期定位试验的规模和时间以及所能代表的各类因子的范围都有限, 在相对较短时间内往往不能反映有机 C 变化的最终强度, 而模型将是唯一可能解决此类问题的方法<sup>[13]</sup>。利用有机 C 模拟模型可以预测种植制度、施肥、利用方式改变等不同措施对土壤有机 C 的影响, 进而确定土壤和大气 CO<sub>2</sub> 的源汇关系<sup>[12,16]</sup>, 但目前国内外有机 C 周转模型多因结构复杂、要求条件高、需要参数多而影响了模型的广泛应用<sup>[10-13]</sup>。Jenny 数学模型能较好地预测土壤有机 C 的动态和平衡, 并因其简便, 涉及参数

少而被许多研究者应用<sup>[14,17-20]</sup>。本试验旨在研究长期施肥条件下不同施肥措施对潮土有机 C 含量的影响, 并利用 Jenny 模型确定潮土有机 C 的平衡含量和分解速率, 为研究潮土有机 C 的动态以及正确评价施肥措施对潮土固 C 潜力的影响提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验介绍

试验地点在中国科学院封丘农业生态实验站内 (35°00' N, 114°24' E), 位于华北平原的中心。该地区年均降水量 605 mm, 年均蒸发量 1875 mm, 年均气温为 13.9℃, 无霜期在 220 天左右, 属半干旱、半湿润的暖温带季风气候区。供试土壤为黄河沉积物发育而成的潮土, 质地为砂壤土。试验起始于 1989 年秋, 轮作方式为春小麦-夏玉米。试验开始时 0~20 cm 土壤的理化性质为: 有机质 5.83 g/kg, 全 N 0.44 g/kg, pH 8.65。试验共设 7 个处理, 分别为 ① CK; ② NP; ③ NK; ④ PK; ⑤ NPK; ⑥ 1/2OM + 1/2NPK; ⑦ OM, 4 次重复。每年施肥量 N 为 300 kg/hm<sup>2</sup> (尿素), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 135 kg/hm<sup>2</sup> (过

①基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2005CB121101) 资助。

\* 通讯作者 (zccai@mail.issas.ac.cn)

作者简介: 尹云峰 (1975—), 男, 黑龙江人, 博士, 讲师, 主要从事农田土壤碳平衡方面的研究。E-mail: yunfengyin@163.com

磷酸钙),  $K_2O$  为  $300 \text{ kg/hm}^2$  (硫酸钾)。有机肥处理的施肥量 (N、P、K 养分量) 与 NPK 处理的相同, 原料以粉碎的麦秆为主, 加上适量的大豆饼和棉仁饼。有机肥经堆制发酵后施用, 年施用量约  $18000 \text{ kg/hm}^2$  (以鲜重计)。有机肥施用前先分析 N、P 和 K 含量, 以等 N 量为标准, P 和 K 含量不能满足施肥要求, 用化肥 P 和 K 补充至等量。化肥 P 和化肥 K 及有机肥作为基肥一次性施入, 而化肥 N 分作基肥和追肥两次施入, 具体试验介绍详见文献 [1, 21]。本文选择 CK、NPK、1/2OM 和 OM 处理来研究不同施肥措施对潮土有机 C 平衡及固 C 潜力的影响。土壤有机 C 测定采用重铬酸钾-硫酸容量法, 土壤体积质量 (容重) 测定采用环刀法。

### 1.2 Jenny 模型的简单描述

长期定位试验条件下土壤有机 C 的动态可由 Jenny 模型预测, 即:

$$dC/dt = A - rC \quad (1)$$

式中  $dC/dt$  为土壤有机 C 的变化率;  $A$  为有机 C 年输入量 ( $\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{a})$ );  $r$  为有机 C 年分解速率 ( $1/\text{a}$ )。如果试验条件稳定,  $r$  和  $A$  为常数, 则上式积分得:

$$C = A/r + (C_0 - A/r) e^{-rt} \quad (2)$$

式中  $A/r$  为达到平衡状态时的有机 C 含量, 可用  $C_e$  来表示, 则式 (2) 可写成

$$C = C_e + (C_0 - C_e) e^{-rt} \quad (3)$$

式中  $C$  为  $t$  时间后土壤有机 C 含量 ( $\text{g}/\text{kg}$ );  $C_0$  为试验初土壤有机 C 含量 ( $\text{g}/\text{kg}$ );  $t$  为时间 ( $\text{a}$ )。

### 1.3 数据分析

本文试验数据统计分析采用 SPSS12.0 for Window 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥措施对潮土有机 C 含量和体积质量的影响

经过连续 15 年的定位试验, 不同施肥措施下的潮土有机 C 含量见表 1。同 1989 年相比, 2003 年的潮土有机 C 含量除 CK 处理略有下降外, 其他施肥处理均有明显提高, 并且呈  $OM > 1/2OM > NPK > CK$  的变化规律。同 CK 处理相比, 化肥和有机肥的施用提高了潮土有机 C 含量, NPK 处理的土壤有机 C 含量提高了 40%, 而 OM 处理的则提高了 115%, 可见有机肥处理的效果要明显优于化肥处理。方差分析进一步表明, 同 CK 处理相比, 施肥处理对潮土有机 C 含量的影响都达到了  $P < 0.05$  的

显著水平, 并且 NPK 和 OM 处理的效果明显不同, 两者差异也达到了  $P < 0.05$  的显著水平 (表 1)。

表 1 不同施肥措施下的土壤有机 C 含量和体积质量

Table 1 SOC contents and bulk densities under different fertilization treatments

处理	有机 C 含量 ( $\text{g}/\text{kg}$ )		体积质量 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	
	1989 年	2003 年	1989 年	2003 年
CK	4.33 a	3.77 d	1.62	1.58
NPK	4.47 a	5.28 c	1.62	1.52
1/2OM	4.58 a	6.63 b	1.62	1.46
OM	4.49 a	8.10 a	1.62	1.42

注: 同一列中不同字母代表差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

体积质量是土壤的重要物理特性指标, 也是土壤 C 储量精确估算的关键。15 年的定位施肥试验表明, 不同处理的土壤体积质量均有所下降, 其中 OM 处理的下降幅度最大, 而 CK 处理的下降幅度最小 (表 1)。2003 年不同处理的土壤体积质量表现为  $CK > NPK > 1/2OM > OM$  的趋势, 这一结果表明长期施肥可以降低潮土的体积质量, 并且有机肥处理的作用效果要比化肥处理的明显。

### 2.2 不同施肥措施对潮土有机 C 平衡的影响

利用定位施肥试验历年土壤有机 C 数据 (1989—2003 年), 采用非线性回归方法对有机 C 含量随时间的变化进行拟合, 由此获得了各施肥处理下潮土有机 C 的平衡含量和分解速率 (表 2)。结果显示, 不同施肥措施影响了潮土有机 C 的平衡水平和分解速率, NPK、1/2OM 和 OM 处理的有机 C 平衡值分别为 7.19、7.75 和 9.37  $\text{g}/\text{kg}$ , 而有机 C 的分解速率则分别为 0.038、0.113 和 0.145  $1/\text{a}$ 。拟合方程的相关系数  $R^2$  都达到了极显著水平 ( $P < 0.01$ ),

表 2 不同施肥措施下的土壤有机 C 平衡值和分解速率

Table 2 Equilibrium values and decomposition rates of SOC under different fertilization treatments

处理	有机 C 平衡含量 ( $\text{g}/\text{kg}$ )	有机 C 分解速率 ( $1/\text{a}$ )	相关系数 ( $R^2$ )
CK	3.97	0.013	0.872**
NPK	7.19	0.038	0.825**
1/2OM	7.75	0.113	0.950**
OM	9.37	0.145	0.981**

注: \*\*显著性水平,  $P < 0.01$ 。

表明  $C = C_e + (C_o - C_e) e^{-rt}$  方程可以较好地描述不同施肥处理下的潮土有机 C 动态。

### 2.3 不同施肥措施对潮土 C 储量及固 C 潜力的影响

施肥不但影响了耕层土壤有机 C 含量, 也影响着耕层土壤有机 C 储量。根据 1989 年 (试验初) 和 2003 年有机 C 含量以及土壤体积质量数据计算了土壤有机 C 的储量 (表 3)。数据表明施肥能够增加耕层土壤 (0~20 cm) C 储量, 并且 OM 处理要比 NPK 处理增加的效果明显。截至 2003 年, NPK、1/2OM 和 OM 处理的土壤有机 C 储量已达 16050、19360 和 23000 kg/hm<sup>2</sup>, 与试验初相比, 有机 C 储量分别增加了 10.8%、30.4% 和 58.2%。假定土壤有机 C 达到平衡时的土壤体积质量与 2003 年的相同, 本文也计算了平衡时的土壤有机 C 储量, 通过平衡时的有机 C 储量与试验初有机 C 储量的差值, 获得了不同施肥处理对潮土固 C 潜力的影响。结果发现, 同 CK 相比, 施肥措施增强了潮土的 C 汇作用。各施肥处理的土壤有机 C 达到平衡状态时, NPK 处理的土壤将会增加 C 7376 kg/hm<sup>2</sup>, 而 1/2OM 和 OM 处理的则分别增加 C 7790 和 12066 kg/hm<sup>2</sup>。

表 3 不同施肥措施下的耕层土壤有机 C 储量和固 C 潜力  
Table 3 Effects of different fertilization on storage of SOC and capacity of soil stabilizing organic carbon

处理	有机 C 储量 (kg/hm <sup>2</sup> )			固 C 潜力 (kg/hm <sup>2</sup> )
	1989 年	2003 年	平衡时	
CK	14020 a	11910 d	12542	-1478
NPK	14480 a	16050 c	21856	7376
1/2OM	14840 a	19360 b	22630	7790
OM	14540 a	23000 a	26606	12066

### 3 讨论

长期定位施肥试验可以研究土壤有机 C 的动态和平衡, 然而土壤有机 C 的动态平衡受环境因素、土壤因素和农业管理措施等条件的制约, 其动态变化方向取决于土壤 C 输入量和输出量的相对大小, 当 C 的输入量大于输出量时, 土壤有机 C 将不断提高, 直到达到平衡为止, 相反亦然<sup>[5, 8, 17, 22]</sup>。当然, 这种平衡是在环境因素、土壤条件、作物残体管理、耕作和轮作制度以及施肥等农业措施保持不变的情况下建立的, 任何条件的改变都将影响平衡的方向和水平<sup>[17]</sup>。施肥措施可以增加土壤 C 含量, 但不能

无限地增加土壤 C 含量, 当 C 输入等于 C 输出时, 土壤 C 含量最终达到一个新的动态平衡<sup>[8]</sup>。Jenny 数学模型是最简单的土壤有机 C 周转模型, 运用该模型要符合如下假设条件, 即假定土壤有机 C 年分解速率和每年归还土壤中的有机 C 量保持不变、土壤有机 C 是单一组分且以指数形式分解。尽管 Jenny 模型过于简单, 但在 10~100 年范围内对土壤有机 C 模拟值与田间数据相比, 吻合性较好<sup>[14]</sup>。本研究利用长期定位施肥试验并结合 Jenny 模型对潮土有机 C 的平衡值进行预测, 从拟合结果来看, Jenny 模型可以较好地预测潮土有机 C 的平衡水平, 相关系数 R<sup>2</sup> 都达到了极显著水平 (表 2)。在目前施肥模式不变情况下, 潮土有机 C 的平衡含量在 7.19~9.37 g/kg 范围内, 这一结果与其他学者确定的有机 C 平衡值基本吻合。严慧峻等<sup>[17]</sup>研究黄淮海平原盐渍土有机 C 的消长规律, 发现在黄淮海平原一年两熟轮作制度下, 中等肥力水平的农田土壤有机 C 平衡含量在 6.5~9.0 g/kg 之间。而李忠佩等<sup>[5]</sup>研究发现潮土有机 C 平衡含量一般在 9.5 g/kg 左右。

王维敏等<sup>[20]</sup>对黄淮海地区农田土壤有机 C 平衡进行研究, 发现黄淮海地区农田土壤有机 C 分解速率介于 2.0%~6.2% 之间。李忠佩等<sup>[23]</sup>研究发现黄淮海平原的潮土有机 C 年均分解速率为 6.4%。雷宏军等<sup>[24]</sup>利用 CQESTR 模型对黄淮海平原长期定位施肥的土壤有机 C 动态进行了模拟, 认为潮土有机 C 分解速率在 2.2%~6.0% 范围内。本试验研究发现 CK 和 NPK 处理的土壤有机 C 分解率分别为 1.3% 和 3.8%, 这一结果与前人研究结果基本相近, 但是 1/2OM 和 OM 处理土壤有机 C 分解率分别为 11.3% 和 14.5%, 这一数据偏高。其原因可能在于 1/2OM 和 OM 处理施用了大量新鲜有机物质, 可能促进了土壤原有机 C 的分解, 并且 1/2OM 和 OM 处理每年新形成的有机 C 较多, 而新形成的有机 C 分解速率要明显快于土壤原有机 C, 但模型获取的数据为两者的综合。另外也不排除 Jenny 模型本身的局限性, Jenny 模型在外源 C 输入量较大的土壤上应用要特别慎重。

以往的研究多注重施肥措施对耕层土壤有机 C 含量的影响<sup>[17-20, 25]</sup>, 对耕层土壤有机 C 储量的影响研究不多<sup>[1]</sup>, 主要原因是许多定位试验缺少土壤体积质量数据。本研究结果显示, 施肥不但提高了耕层土壤有机 C 含量, 而且也增加了耕层土壤 C 储量, 并且有机肥处理的效果要明显优于化肥处理。

在目前施肥模式不变的情况下, 当各施肥处理的土壤有机 C 达到平衡状态时, 潮土将会增加 C 7376 ~ 12066 kg/hm<sup>2</sup>。由此可见, 施肥是提高土壤 C 储量的重要措施, 但施肥种类和数量对土壤 C 储量的提高也存在影响。从土壤有机 C 储量收支情况来看, 可以认为施肥处理促进了潮土的 C 固定。

**致谢:** 研究样品由中国科学院南京土壤研究所钦绳武研究员提供, 特此感谢!

#### 参考文献:

- [1] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对土壤碳储量和作物固定碳的影响. 土壤学报, 2005, 42 (5): 769-776
- [2] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家安全. 地球科学进展, 2005, 20 (4): 384-393
- [3] 杨学明, 张晓平, 方华军. 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义. 地理科学, 2003, 23 (1): 101-106
- [4] 张国盛, 黄高宝, Yin C. 农田土壤有机碳固定潜力研究进展. 生态学报, 2005, 25 (2): 351-357
- [5] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云, 尹瑞龄, 施亚琴. 红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析. 土壤学报, 2003, 40 (3): 344-352
- [6] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123: 1-22
- [7] Paustian K, Six J, Elliott ET, Hunt HW. Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 147-163
- [8] Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implication for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241: 155-176
- [9] Cai ZC, Qin SW. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Geoderma*, 2006, (online available)
- [10] Coleman K, Jenkinson DS, Crocker GJ, Grace R, Klir J, Körschens M, Poulton PR, Richter DD. Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets. *Geoderma*, 1997, 81: 29-44
- [11] Smith WN. A comparison of the performance of nice soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 1997, 81: 153-225
- [12] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 宗良纲. 农田土壤有机碳动态模拟模型的建立. 中国农业科学, 2001, 34 (5): 465-468
- [13] 吴金水, 刘守龙, 童成立. 土壤有机碳周转计算机模拟原理. 土壤学报, 2003, 40(5): 768-774
- [14] Dalal RC, Mayer RJ. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. IV. Loss of organic carbon from different density fractions. *Australian Journal of Soil Research*, 1986, 24: 301-309
- [15] Yang HS, Janssen BH. Analysis of impact of farming practices on dynamics of soil organic matter in northern China. *European Journal of Agronomy*, 1997, 7: 211-219
- [16] 陈庆强, 沈承德, 易惟熙, 彭少麟, 李志安. 土壤碳循环研究进展. 地球科学进展, 1998, 13(6): 555-563
- [17] 严慧峻, 刘继芳, 张锐, 单秀枝, 魏由庆, 许建新, 高峻岭, 马卫萍, 殷光兰, 安文钰. 黄淮海平原盐渍土有机质消长规律的研究. 植物营养与肥料学报, 1997, 3 (1): 1-8
- [18] 穆琳, 张继宏, 关连珠. 施肥与地膜覆盖对土壤有机质平衡的影响. 农村生态环境, 1998, 14 (2): 20-23
- [19] 辛刚, 颜丽, 汪景宽, 关连珠. 不同开垦年限黑土有机质变化的研究. 土壤通报, 2002, 33 (5): 332-335
- [20] 王维敏, 张明清, 王文山, 蔡典雄, 张美荣. 黄淮海地区农田土壤有机质平衡的研究. 中国农业科学, 1988, 21 (1): 19-26
- [21] 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. 土壤学报, 1998, 35 (3): 367-375
- [22] 王胜佳, 陈义, 李实焯. 多熟制稻田土壤有机质平衡的定位研究. 土壤学报, 2002, 39(1): 9-15
- [23] 李忠佩, 林心雄, 车玉萍. 中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析. 土壤学报, 2002, 39 (3): 351-360
- [24] 雷宏军, 李保国, 自由路, 黄元仿, 李科江. 黄淮海平原区不同农作措施下耕层土壤有机质矿化与 CO<sub>2</sub> 排放估算. 中国农业科学, 2005, 38 (10): 2035-2042
- [25] 张爱君, 张明普. 黄潮土长期轮作施肥土壤有机质消长规律的研究. 安徽农业大学学报, 2002, 29 (1): 60-63

## Effect of Fertilization on Equilibrium Levels of Organic Carbon and Capacities of Soil Stabilizing Organic Carbon for Fluvo-aquic Soil

YIN Yun-feng<sup>1,2</sup>, CAI Zu-cong<sup>1</sup>

(*1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;*

*2 Fujian Provincial Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment, College of Geographical Sciences,*

*Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*)

**Abstract:** Long-term experiment in Fluvo-aquic soil at Fengqiu Agro-Ecological Experiment Station of CAS in Henan was utilized to study effect of different fertilization treatments on soil organic carbon (SOC), and simple Jenny model was used to simulate dynamics of organic carbon. Results showed that application of inorganic and organic fertilizers significantly increased SOC contents of Fluvo-aquic soil, while effect of organic fertilizer was more obvious than inorganic fertilizer; Fertilization not only affected equilibrium levels of organic carbon but also changed decomposition rates of organic carbon significantly; Equilibrium values of organic carbon were 7.19, 7.75 and 9.37 g/kg for NPK, 1/2OM and OM treatments, respectively whereas the decomposition rates of organic carbon were 0.038, 0.113 and 0.145 1/a for corresponding three fertilizer treatments, respectively. Compared with storage of C in 1989, when soil organic carbon reached the equilibrium state, storage of C in CK treatment would lose 1478 kg/hm<sup>2</sup>, but would increase 7376, 7790 and 12066 kg/hm<sup>2</sup> in NPK, 1/2OM and OM treatments, respectively; Fertilization practices would intensify Fluvo-aquic soil function as C sink.

**Key words:** Fertilization, Fluvo-aquic soil, Equilibrium levels of soil organic carbon, Capacity of soil stabilizing organic carbon