

多熟制稻田土壤有机质平衡的定位研究

王胜佳 陈 义 李实烨

(浙江省农业科学院土壤肥料研究所, 杭州 310021)

摘 要 在麦稻稻三熟制下进行了连续 26 年定位试验。结果表明, 长期施用有机肥可以在保持高产稳产条件下使土壤有机质持续增长, 可以显著影响有机质的增长速度, 并培肥土壤有机质达到 60g kg^{-1} 的高水平。在此基础上, 构建了多熟稻田土壤的有机质数量演化数学模型, 计算得出保持土壤有机质平衡只需厩肥 $4.8\text{t hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 。

关键词 定位试验, 水稻土, 土壤有机质, 模型

中图分类号 S158.3

定位试验可以系统观察特定气候、土壤、种植制度下施肥对于产量、土壤肥力和土壤环境的影响, 因此在国内普遍受到重视^[1,2]。Rothamsted, Morrow 等地的这类肥料定位试验虽已延续一百多年, 但仍在延续^[3]。土壤有机质演化的预测预报是当前国际土壤有机质研究的热点, 迄今为止提出的模型不下数十个, 但完全局限于旱地、林地、草地, 对水田土壤尚无涉及^[3~5]。

我国的定位试验起步较晚, 八十年代随着化肥用量的迅速上升取得了很大的进展, 目前已向网络化发展。由于积累的资料尚嫌不足, 目前还少有土壤有机质演化模型研究。本试验为使浙江省主要种植制度麦稻稻三熟制粮食持续增产和土壤培肥, 自 1973 年 10 月开始, 已持续进行了 26 年^[6,7]。本文主要讨论土壤有机质在多熟和连年施用大量厩肥条件下的消长规律, 并对其进行数学模拟。有关肥效、土壤氮磷钾养分的平衡部分将另文论述。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤状况

试验在浙江省台州市路桥区滨海 15km 的平原地区进行。供试土壤母质为海相沉积物。质地偏粘, 土壤耕层厚 18cm, $<0.001\text{mm}$ 粘粒含量为 256g kg^{-1} , 主要粘土矿物为高岭石、绢云母、绿泥石和针铁矿。土壤含有有机质 32.3g kg^{-1} , 全 N 2.3g kg^{-1} , 全磷(P) 0.56g kg^{-1} , 全钾(K) 20.58g kg^{-1} , pH5.2, CEC 16.8cmol kg^{-1} 。小区面积为 78m^2 , 小区之间 1990 年以前以土埂间隔, 1991 年以后以 10cm 厚、30cm 深的水泥板间隔。

1.2 试验方案

试验共设 5 个处理:

(1) M45 施用尿素 $\text{N}345\text{kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 猪厩肥 45t

(2) M22.5 施用尿素 $N345\text{kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 猪厩肥 22.5t

(3) F80 施用尿素 $N330\text{kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 猪厩肥 16.5t

(4) F60 施用尿素 $N247.5\text{kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 猪厩肥 33t

(5) F40 施用尿素 $N165\text{kg hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$, 猪厩肥 49.5t

上述处理分两组。M22.5 和 M45 为一组, 代表等化肥用量下厩肥的常规用量和倍量处理。F40、F60 和 F80 为另一组, 代表等氮量下化肥氮占施入全氮的比例分别为 40%、60% 和 80% (厩肥含氮量按 5g kg^{-1} 计算)。试验未设重复。

1.3 分析方法

土壤有机质、土壤易氧化有机质和土壤活性有机质的分析采用不同浓度的重铬酸钾消煮法^[8,9]。

2 结果与讨论

2.1 长期施用有机肥对土壤有机质消长的影响

2.1.1 施用猪厩肥使土壤有机质持续增长 试验显示, 所有 5 个处理的有机质与试验前的 32.3g kg^{-1} 相比, 均有大幅度提高, 且虽经 26 年的连续施肥, 总体上仍处于持续上升之中, 如表 1 所示。但试验后期土壤有机质增长变缓, 土壤有机质的数量增长速率趋于平稳。

以年施用厩肥 45t 的 M45 处理为例。从 1973 年至 1984 年 11 年间, 土壤有机质从 32.3g kg^{-1} 增长至 44.9g kg^{-1} , 增加了 39%, 年均增长率 3%; 而 1984 年至 1999 年 15 年间, 土壤有机质仅增加 27.17%, 年均增长率为 1.62%, 大大小于前 11 年的增长率。

表 1 土壤有机质含量的变化

Table 1 Change in soil organic matter (g kg^{-1})

年份 Year	M45	M22.5	F40	F60	F80	年份 Year	M45	M22.5	F40	F60	F80
1973			32.3			1990	52.1	48.4	52.7	48.8	48.3
1974	32.5	32.4	34.6	32.7	32.9	1994	52.1	44.7	55.0	46.8	43.1
1978	38.2	39.5	37.8	35.2	33.5	1999	57.1	53.4	59.9	55.6	47.6
1984	44.9	38.9	44.2	39.3	34.7						

2.1.2 土壤活性有机质增加 经过连年施用厩肥, 土壤易氧化有机质和土壤活性有机质的数量也有了大幅度的提高。从 1978 年至 1990 年 12 年间, 2 个高厩肥用量的处理 F40 和 M45, 土壤易氧化有机质和土壤活性有机质的数量均增加 100% 以上; 其他 3 个处理厩肥用量较低, 土壤易氧化有机质的增加幅度也不低于 90%, 土壤活性有机质的增加幅度则在 66% 以上(表 2, 表 3)。

表 2 土壤易氧化有机质的变化

Table 2 Change in readily-oxidizable soil organic matter (g kg^{-1})

年份 Year	M45	M22.5	F40	F60	F80	年份 Year	M45	M22.5	F40	F60	F80
1978	15.3	13.5	14.1	15.4	13.3	1993	30.3	26.6	32.3	28.2	24.8
1990	33.2	26.6	30.8	29.1	25.8						

表3 土壤活性有机质的变化

Table 3 Change of active soil organic matter (g kg^{-1})

年份 Year	M45	M22.5	F40	F60	F80	年份 Year	M45	M22.5	F40	F60	F80
1978	4.65	4.45	4.68	4.19	4.55	1990	10.7	8.1	9.05	7.86	7.55

土壤中易氧化有机质数量越多,活性有机质含量越多,这表明土壤有机质代谢强度和养分供应能力越强。因此,试验结果说明,在每年厩肥用量达到 16.5t hm^{-2} 以上时,土壤有机质的养分供应能力有了很大的提高。

2.1.3 土壤有机质的平衡和土壤理化性质的改善 表1还表明,在该种轻粘土土壤上,施猪厩肥 $16.5\text{t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 的 F80 处理,其土壤有机质的增长也并不低。26年后,达到 47.6g kg^{-1} ,较试验前增加了 47.37%,相当于每年较上年增长 1.56%。这意味着,实现土壤有机质平衡的猪厩肥用量可以远低于 16.5t 。按数学模型测算,这一用量大约为 $4.8\text{t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。显然,这一数值较前人的估测值为小^[2]。

以往的估算是以土壤有机质的年分解量的测算、作物根茬和凋落物数量以及根茬、凋落物、厩肥、秸秆等有机物料的腐殖化系数测定为基础,按平衡法进行的。在太湖地区,对于产量水平在 $10\text{t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 的 2~3 熟制稻田土壤,通常认为必须补充相当于能形成 $1.5\text{t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 土壤有机质的有机物料。按厩肥 0.3 的腐殖化系数,0.25~0.3 的折干系数估算,这相当于需要施用 $15\text{t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 左右的厩肥。

本试验的气候和土壤条件与太湖地区相近,但 5 个处理 26 年的年均产量已达 $15.95\text{t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$,因而其根茬和凋落物的数量较前人估算采用的 $10\text{t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 产量水平可能会有较多的增加。另一方面,本试验长期持续的麦稻稻三熟种植制度下,与常规农田的麦稻二熟或二年五熟及一定程度的轮作相比,除了根茬和凋落物的数量增加外,由于淹水时间的延长,从而是否会导致在土壤有机质的年分解速率、有机物料的腐殖化系数等方面有所不同,可能也是影响土壤有机质平衡的因子,需要进一步探究。

有关研究和调查显示,通常的青紫泥田和黄化青紫泥田,土壤有机质一般在 $30\sim 45\text{g kg}^{-1}$ 。更高的土壤有机质常常与积水不畅、没有熟化的低产田联系在一起^[10]。

本试验显示,长期持续施用有机肥状况下形成的、物理性状良好的高产稻田,其土壤有机质含量可以达到 60g kg^{-1} 而远远超过当地一般农田 3%~3.5% 的高水平。试验前供试土壤(黄化青紫泥田)在当地为中等肥力。长期施用有机肥在实现持续高产的同时,土壤肥力也得到很大提高,土壤的各项主要理化性质指标一般也都有明显的改善。

以 F40 处理为例。经过连续 26 年的施用厩肥,土壤有机质已经达到了 60g kg^{-1} 的高水平,麦稻稻三熟的产量稳定在 $17\sim 18\text{t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 的较高水平^[7]。而且其他土壤肥力指标也有很大改善。土壤 pH 由 5.2 上升至 5.46,盐基代换量由 16.8cmol kg^{-1} 上升至 17.8cmol kg^{-1} ,土壤全氮由 2.3g kg^{-1} 上升至 3.78g kg^{-1} ,速效氮由 196mg kg^{-1} 上升至 356mg kg^{-1} ,土壤全磷由 1.38g kg^{-1} 上升至 1.98g kg^{-1} ,速效磷由 16.8mg kg^{-1} 上升至 52.5mg kg^{-1} ;土壤物理性质也得到改善,土壤容重由 0.94g cm^{-3} 降低至 0.78g cm^{-3} ,总孔隙度从 63.45% 增加至 72.45%,毛管孔隙度从 54.05% 增加至 64.35%。

2.2 有机肥施用量对土壤有机质消长影响的数学模型

2.2.1 厩肥施用量决定土壤有机质的增长速率 土壤有机质含量的增长与厩肥施用

量有着良好的相关性。施用有机肥多,土壤有机质的增加也多。经过 26 年后,高厩肥的 F40 区和 M45 区的有机质总量分别达到 59.9g kg^{-1} 和 57.1g kg^{-1} 的高水平(表 1),比试验之初分别增加 85.44% 和 76.78%,其年均增长率分别达到了 2.4% 和 2.21%。F60 区的相应数值分别为 65.6g kg^{-1} , 72.13% 和 2.11%。有机肥用量较低的 M22.5 处理土壤有机质也增加了 65.32%,达到 53.4g kg^{-1} ,其年均增长率达到了 2.03%

从耕层土壤的有机质数量看,由于试验过程中土壤容重的降低,其增长速率较土壤有机质含量的增长速率为低,且各处理之间的差异也较小。试验之初 0~15cm 土壤表层有机质总量为 455.43t hm^{-2} 。26 年后,高厩肥的 F40 区和 M45 区的有机质分别达到 700.83t hm^{-2} 和 668.07t hm^{-2} ,比试验之初分别增加 53.88% 和 46.69%,其年均增长率达到了 1.671% 和 1.484%。F60 区的相应数值为 683.88t hm^{-2} , 50.16% 和 1.574%。有机肥用量较低的 M22.5 和 F80 处理也增加了 45.98% 和 31.69%,达到了 664.83t hm^{-2} 和 599.76t hm^{-2} ,其年均增长率分别为 1.466% 和 1.064%。

试验中,伴随着土壤有机质的逐渐增加,各处理区的作物产量也稳步提高。并且,作物产量较高的处理,土壤有机质的增加也较多。F40、F60 和 F80 在 1974 年试验开始时的全年产量分别为 13597.5kg hm^{-2} 、 13500kg hm^{-2} 和 12772.5kg hm^{-2} ,至 1999 年其全年产量水平分别达到 17812kg hm^{-2} 、 16737kg hm^{-2} 和 16105kg hm^{-2} ,分别增长了 31%、24% 和 26.1%。显然,作物产量的增长幅度较土壤有机质的增长幅度小得多。

2.2.2 有机肥用量对土壤有机质增长的影响的数学模拟 土壤有机质(Y)因施一定厩肥而逐年(X)增长的状况,可用幂指数回归方程表达,并都达到了极显著的水平。

幂指数方程的形式为:

$$Y = C + b_1 X_1^{a_1} X_2^{a_2} \quad (1)$$

式中, Y 为有机质含量; C 为土壤有机质的初始值(该土壤为 32.3g kg^{-1}); X_1 为时间变量,以年为单位; X_2 为有机肥投入变量,单位为 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$; b_1 为系数项; a_1 , a_2 为各变量指数。

对于该定位试验,有(见图 1):

$$Y = 32.3 + 0.167 X_1^{0.931} X_2^{0.479}, R = 0.74^{**}, n = 85 \quad (2)$$

2.2.3 稻田土壤有机质演化的数学模型 根据我们在嘉兴双桥、衢州十里丰两个 10 年多熟制定位和金华蒋堂、温州、绍兴、台州等地的多个 6 年多熟制定位及上海、四川等地的多个 10 年以上 2~3 熟稻田定位试验的研究结果,不施肥或仅施化肥而不施有机肥条件下,土壤有机质均呈下降趋势。即是说,在不施肥或仅施化肥而不施有机肥此 2 种条件下,回归土壤的作物根茬量不足以补偿土壤有机质的矿化分解,即当 $X_2 = 0$ 时,应当是 $Y < C$ 。但依据(1)式却为 $Y = C$,不符合多点定位试验的实际结果。

这说明,(1)式仅适用于施用有机肥的状况,在不施有机肥时不能适用。为建立广泛适用的数学模型,有必要引入 $b_2 X_1^{a_3}$,将(1)式转化为多项式方程。因此有:

$$Y = C + b_1 X_1^{a_1} X_2^{a_2} + b_2 X_1^{a_3} \quad (3)$$

b_1 , b_2 为各项系数; a_1 , a_2 , a_3 为各变量指数。(3)式是一个简化的稻田土壤有机质演化模型。对(3)式进行微分可得到有机质年增长速率 dy/dx_1

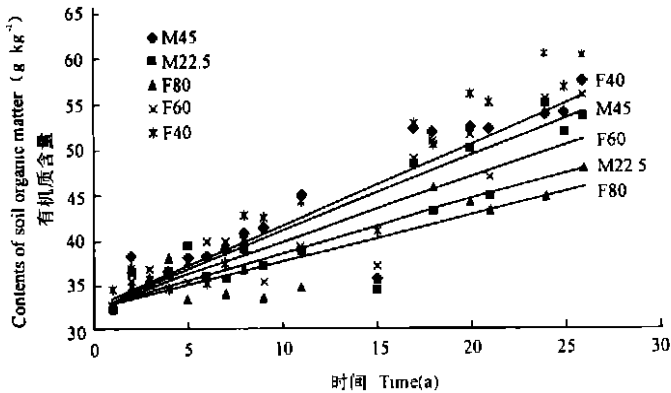


图 1 有机肥用量对土壤有机质含量演变的影响

Fig. 1 Effect of pig manure on content of soil organic matter

$$\frac{dy}{dx_1} = b_1 a_1 X_1^{(a_1-1)} X_2^{a_2} + b_2 a_3 X_1^{(a_3-1)} \quad (4)$$

对于本试验, 回归分析得出有机质年增长速率($\frac{dy}{dx_1}$) 模型为:

$$\frac{dy}{dx_1} = 0.4528X_1^{-0.4496} X_2^{0.438} - 0.779X_1^{-0.55} \quad (5)$$

根据(5)式可计算得到列示于表4的本试验中各处理在不同年份下的土壤有机质含量的年增长速率。结果说明各处理的这一增长速率均呈快速递减状况。

表 4 有机质年增长速率的变化

Table 4 Change in annual increase rate of soil organic matter ($\text{g kg}^{-1} \text{a}^{-1}$)

年份 Year	M45	M22.5	F40	F60	F80	年份 Year	M45	M22.5	F40	F60	F80
1	1.620	0.992	1.722	1.315	0.767	30	0.400	0.264	0.422	0.334	0.215
10	0.632	0.409	0.669	0.524	0.329	50	0.323	0.214	0.340	0.270	0.176
20	0.474	0.311	0.500	0.395	0.252	100	0.241	0.161	0.254	0.202	0.133

对(5)式积分可得到土壤有机质含量演变模型:

$$Y = \int \frac{dy}{dx_1} dx_1 = C + 0.8226X_1^{0.5504} X_2^{0.438} - 1.73X_1^{0.45} \quad (6)$$

(6)式是(3)式多项式模型的具体化。将有机肥施用量(X_2)确定, 可得到各处理在特定年份(X_1)的土壤有机质(Y)含量的具体数学模型。这些模型均达到了1%显著水平。

例如对于F40, 有:

$$Y = C + 4.544X_1^{0.5504} - 1.73X_1^{0.45}, R = 0.8306^{**} \quad (7)$$

根据公式(6), 各处理的因素 X_1 即时间变量的首项系数值分别为: F40区4.544; M45区4.358; F60区3.805; M22.5区3.217; F80区2.808; 有机质含量(Y)的增加次序为F40区>M45区>F60区>M22.5区>F80区, 即土壤有机质含量随厩肥施用量增长而增长, 两者存在正相关。并且, 公式(6)中有机肥施用量(X_2)的指数项为0.438, 接近于0.5, 可以认为在这种土壤上土壤有机质与年厩肥施用量的平方根大体成正比。为增加土壤有机

质,一年大量施用有机肥的效果不如年年施用少量有机肥。因为,当 X_1 确定即 $X_1 = \text{常数}$ 时,公式(3)转化为:

$$Y = C(1 - C_2) + C_1 X_1^n \quad (8)$$

(8)式中, C_2 为该土壤的土壤有机质年分解率,单位为%。这一模型对农业生产的具体意义在于说明了在仅施用化肥而不施用有机肥时,土壤有机质将按一定速率逐步下降;为保持土壤有机质平衡,每年只需补充少量有机肥;培肥土壤则需要持续施用有机肥。

上述经验模型可以对土壤有机质的未来演化进行预测预报。根据此模拟方程进行计算,M45区、M22.5区和F40区、F60区、F80区如果在进行了50年试验后的土壤有机质理论值分别为 59.8 g kg^{-1} 、 50 g kg^{-1} 、 61.4 g kg^{-1} 、 $55. \text{ g kg}^{-1}$ 和 46.4 g kg^{-1} ;延续至100年,相应计算值分别是 73.5 g kg^{-1} 、 59.1 g kg^{-1} 、 75.9 g kg^{-1} 、 66.5 g kg^{-1} 和 54 g kg^{-1} 。我们在全省各地的多个定位试验经检验与上述模型吻合良好,均达到1%显著水平。

参 考 文 献

1. 沈善敏. 国外的长期肥料试验(二). 土壤通报, 1984, (3): 134~ 138
2. 李庆逵. 对我国长期田间试验工作的回顾与展望. 土壤科学与农业持续发展. 北京: 中国科学技术出版社, 1994. 115~ 122
3. Smith P, Smith JU, Powlson DS *et al.* Global Change Terrestrial Ecosystems. GCTE Report No7. GCTE Focus 3, Wallingford, Oxon, 1996
4. Smith P, Smith JU, Powlson DS *et al.* A comparison of the performance of nine soil organic matter models using seven long-term experimental datasets. Geoderma, 1997, 81:153~ 225
5. Molina J A E, Smith P. Modeling carbon and nitrogen processes in soil. Advances in Agronomy, 1997, 62: 253~ 268
6. 李实焯, 王家玉, 王胜佳等. 稻田长期连种粮食三熟制大麦双季稻的高额稳产性和施肥效应. 浙江农业学报, 1993, 5(3): 350~ 358
7. Wang Sheng-jia, Chen Yi, Li shi-yi *et al.* Effect of continuous application of famyard manure on some soil chemical and physical properties in a triple cropped paddy field. 浙江农业学报, 2000, (增刊)
8. 李酉开, 蒋柏藩, 袁可能等. 土壤有机质的测定. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983. 67~ 78
9. 袁可能, 陈通权. 土壤有机无机矿质复合体研究. 土壤各级团聚体中有机矿质复合体的组成及其氧化稳定性. 土壤学报, 1981, 18(4): 335~ 344
10. 林心雄. 我国农田土壤有机质含量及其变异趋势. 土壤科学与农业持续发展. 北京: 中国科学技术出版社, 1994. 123~ 131

BALANCE OF SOIL ORGANIC MATTER IN A LONG-TERM TRIPLE CROPPING SYSTEM IN PADDY FIELDS

Wang Sheng-jia Chen Yi Li Shi-ye

(*Zhejiang Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310021*)

Summary

A long-term field experiment of a triple cereal cropping system (barley-double rice) has been carried on for 26 yrs. Results showed that continuous application of FYM increased SOM successively and eventually reached such a high level as 60g kg^{-1} in SOM content while maintaining high crop yield. The quantity of FYM applied was one of the most important factors which affected the rate of SOM accumulation. A model for the change in SOM was developed. Only 4.8 tons FYM was needed to keep SOM in balance in the barley-double rice cropping system.

Key words Long-term experiment, Paddy soil, SOM, Model